

2 核物質物理

Nuclear Matter Physics

核物質物理ワーキンググループメンバー

実験

民井 淳	TAMII Atsushi	代表、大阪大学核物理研究センター
川畑 貴裕	KAWABATA Takahiro	副代表、大阪大学
秋宗 秀俊	AKIMUNE Hidetoshi	甲南大学
青井 考	AOI Nori	大阪大学核物理研究センター
藤田 佳孝	FUJITA Yoshitaka	大阪大学核物理研究センター
井手口 栄治	IDEGUCHI Eiji	大阪大学核物理研究センター
今井 伸明	IMAI Nobuaki	東京大学原子核科学研究センター
小林 信之	KOBAYASHI Nobuyuki	大阪大学核物理研究センター
三木 謙二郎	MIKI Kenjiro	東北大学
小田原 厚子	ODAHARA Atsuko	大阪大学
王 恵仁	ONG Hooi Jin	Institute of Modern Physics
笹野 匡紀	SASANO Masaki	理化学研究所
関口 仁子	SEKIGUCHI Kimiko	東北大学
嶋 達志	SHIMA Tatsushi	大阪大学核物理研究センター
若狭 智嗣	WAKASA Tomotsugu	九州大学
矢向 謙太郎	YAKO Kentaro	東京大学原子核科学研究センター

理論

蓑茂 工将	MINOMO Kosho	Michigan State University
緒方 一介	OGATA Kazuyuki	大阪大学核物理研究センター
吉田 数貴	YOSHIDA Kazuki	日本原子力研究開発機構
吉田 賢市	YOSHIDA Kenichi	京都大学

世話人

野呂 哲夫	NORO Tetsuo	九州大学
-------	-------------	------

2.1 序

2.1.1 核物質物理分野の目標

核物質の物性の理解を核物質物理分野の目標として掲げる。ここで「核物質」とは、核子（陽子と中性子の総称）を要素として成り立つ系を指す。陽子1つと中性子1つからなる重陽子をはじめ、数百個までの核子からなる原子核、核子が重力により閉じ込められた中性子星、さらには無限の大きさを持つ狭義の核物質までの性質を統一的に扱うことを意味する。また「物性の理解」は、原子核物理学の基礎となる構造・反応・相互作用の三要素を統合的に取り扱い、核物質というユニークな量子多体系に現れる多彩な現象を理解することを意味する。

この目標に到達するために、

- 核力の理解
- 極限原子核の物性
- 原子核の多様な相の起源
- ハドロン相の状態方程式の理解
- 直接反応の真の理解

の5つを主要な柱として研究を展開する。図2.1は核物質物理の目標と各柱に対応するテーマを象徴的に示したものである。これらの柱は互いに深くに関連しており、原子核の統一理論の構築

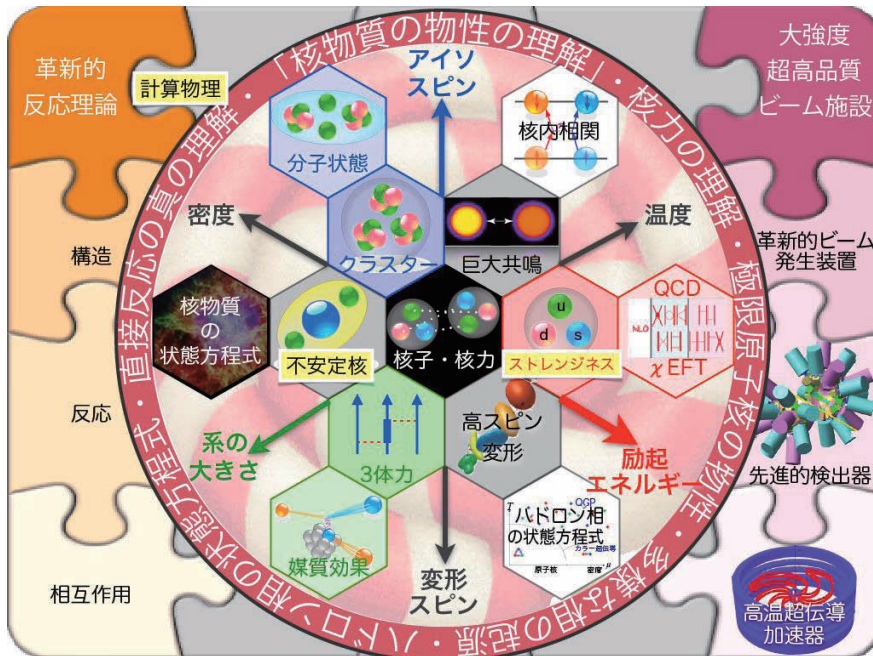


図2.1:核物質物理の将来図。「励起エネルギー」を主軸に据えつつ、アイソスピンや系の大きさ、更には温度・密度・スピンなどの軸に対する原子核の物性を統一的に理解する。新世代高温超伝導加速器からの大強度・超高品質ビームを革新的ビーム発生装置及び先進的検出器と組み合わせることにより、多彩な実験を可能にするとともに、直接反応の真の理解により定量的かつ統一的に理解する。

を通して、総体として核物質の物性の理解を目指す。また、これらの柱や目標は、不安定核やストレンジネスといった他の核物理の分野と密接に関わり合っているのみならず、宇宙物理や物性物理とも深い関わりがある。

核物質物理分野の概要

原子核は、要素である核子の数がたかだか 300 個程度の有限量子多体系である。ほかに有限量子多体系の例としては、原子、分子、金属クラスターなどがあるが、原子核はスピンとアイソスピンという 2 つの自由度（他はスピン自由度のみ）を持つ点と、相互作用がこれらの内部自由度に強く依存する点がユニークである。同じ多体系であっても、核子数を無限個として扱ってよい巨視的な系と数個までの少数系とでは、その物理現象の理解は大きく異なる。また、有限粒子数の多体系は、「形」のような静的な様相のみならず、容易に離合集散することにより生じる動的な様相も極めて豊かである。

核物質の物性的性質を論じる上で扱う典型的な物理量の範囲は、核子を基本的構成粒子として考えることのできるスケール、すなわち原子核の励起エネルギーにおいて数 100 keV から数 10 MeV 程度、温度において 10 MeV 程度以下、密度において原子核の飽和密度である 0.16 核子/ fm^3 を中心に、それより低い密度から 2 倍程度以下である。以下、核物質物理を構成する各柱の概要について説明する。

■ 核力の理解

核物質を理解するためには、その基礎となる相互作用を理解することが重要である。核物質には「強い力」、「弱い力」、「電磁気力」の 3 つの相互作用が主に働くが、この中の強い力を源とする核力が核物質の構造を主に決める。最も基本的な二核子間核力（以下、二核子間力）については、1990 年代に二核子系の実験データを高精度で再現する「現実的核力」が完成した。最近の核力に関する大きな成果として、散乱系での三体力（三核子間力）の実証が挙げられる（コラム「三体力」参照）。

三体力の影響は、二体力の影響が相対的に小さくなる核子当たり 100～200 MeV での三核子系の散乱実験データに顕著に現れると理論的に予測されていた。実際、核子と重陽子の弾性散乱の微分散乱断面積において二体力では説明できない増大が確認され、三体力効果を取り入れることによってその増大が見事に説明された。散乱系での三体力効果の存在が実証されるとともに、三体力効果を取り込んだ核構造計算の精密化などの新たな潮流を生み出している。三体力は高密度での核物質の状態方程式の記述にも欠かすことができない。しかしながら、1990 年代半ばから盛んに測定されたスピン依存量については、従来の三体力モデルでは説明することができないことも明らかになった。

このことは、三体力の運動量やスピン・アイソスピン依存性といった性質の理解が不完全であることを意味している。また最も基本的な二体力についても、その二体を包む核物質の影響、す

なわち核媒質効果を明らかにする必要がある。核媒質効果とは、真空中の2核子間に働く力が、原子核物質（媒質）の中ではどのように変化しているかを表す効果である。また、媒質効果の要素をデルタ粒子などの自由度を顕わに含む系へと拡張していく必要がある。そこで、実験・理論両面からの「核力の理解」をテーマの1つとし、核力場による核物質の統一的理解を目指す。

■ 極限原子核の物性

原子核は孤立した有限多体系であり、スピン、アイソスピン、回転、励起エネルギー、形状などの自由度が明確に定義される。これらの自由度の極限において、原子核や核物質がどのような性質をもち、その振る舞いがどう規定されるかを調べるのが「極限原子核の物性」の課題である。例えば理論的には高速回転の極限は $100 \hbar$ 程度（およそ毎秒 3×10^{22} 回転に対応）であると考えられている。現在の実験のフロンティアは角運動量 $70 \hbar$ 程度である。極限への到達と、極限に現れる核物質の新たな性質の理解を目指す。原子核の多くは球形ではなく変形をしている。それにより量子力学的な回転運動を生じ、離散的な回転励起状態（回転バンド）が普遍的に存在する。さらに楕円型変形や八重極型変形など多様な変形が存在することが、ガンマ線核分光などの実験により明らかにされつつある。しかしながら、最も対称性が高い状態である球形からどのような変形状態が発現するのか、どこまで大きな変形が許されるのか、どのような原子核領域でそのような変形が発現するのか、についてまだ良くわかっていない。これらの問いへの統一的回答を目指す。

■ 原子核の多様な相の起源

有限粒子数の多体系の特徴の1つとして、系を構成する基本的要素がより小さな単位に分解したり、より大きな粒子数からなる複合系（クラスター）に融合したりする「離合集散」現象が挙げられる。核物質の核子あたりの束縛エネルギーはほぼ一定で飽和しており、より小さな原子核の集合体に分解するのにほとんどエネルギーを必要としない。したがって、核物質はごくわずかなエネルギーによって、容易に離合集散する。近年の研究から、軽い原子核においてアルファ粒子を基本単位とするクラスター状態が普遍的に存在することが明らかになるとともに、より大きなクラスターを構成要素とする状態の存在も明らかにされつつある。どれだけ大きな原子核までクラスター構造を取り得るかという存在限界や、中性子過剰核に生じる可能性があるエキゾチックなクラスター状態の探索などがチャレンジングな課題として挙げられる（コラム:希薄なクラスターガス状態を探索する）。

さらに多くの核子が関与する集団的な励起モードとして巨大共鳴がある。例として、陽子群と中性子群が相対的に単振動をする巨大双極子共鳴は全ての原子核において観測されている。また、表面中性子層（中性子スキン）の振動や、ひねり型励起、渦型励起など多様な集団運動状態が予言・観測されている。これらの多彩な励起モードを調べることは、原子核の構造に依存する

部分を均した普遍的な性質、すなわち無限系の核物質の状態方程式の決定において重要な鍵となる。

一方で、多くの核子が独立に運動する中でフェルミ面付近にある二核子がクーパーペアを形成して超流動相が発現し、互いの運動に強い相関関係を持つ現象も観測されている。また、基底状態の核に高運動量をもった相関核子ペアやスピン方向が整列した核子ペアがあることが近年の実験により示唆されている（コラム:中性子-陽子超流動相の発現可能性）。核子群のクラスターリングも核子相関と捉えることができる。この様な相関現象が多様な相を生み、核物質に起きる現象を広く豊かにしている。

■ ハドロン相の状態方程式の理解

多核子系としての原子核の極限として想定される、空間的に無限に広がる無限質量数の一様物質が狭義の核物質である。重い核の中心部は近似的に狭義の核物質が実現した状態と言える。また中性子星は重力により束縛された主に中性子からなる星であり、狭義の核物質であると捉えられる。原子核の有限性に起因する効果を取り除いた多体系の状態方程式を理解することは、物性物理学で研究される様な巨視的な無限多体系と共通の基盤に基づく研究を可能にする。

核物質の 1 核子当りの束縛エネルギーは、多くの原子核の質量を少ないパラメータによって再現する質量公式から引き出せるが、核物質の硬さ（非圧縮率）は質量公式からは分からない。核物質の硬さは系のエネルギーの密度依存性に対応しており、核物質の最も基礎的な物理量の 1 つである。その値は長らく決定に至っていなかったが、原子核の密度が変化する膨張・収縮の振動運動（巨大単極子共鳴）の精密測定により値が確定した。これに対して、中性子星に代表される陽子密度と中性子密度の差（非対称度）が大きい核物質では、状態方程式の非対称項の決定がさらに重要となる（コラム:原子核の電気応答と状態方程式）。

状態方程式は、単位励起エネルギー内に存在する状態の数（準位密度）と密接な関わりがある。準位密度は、核内の温度やエントロピーと関連し、核物質内の核子運動の無秩序さ（複雑さ）を表す尺度となる。近年の研究では、測定スペクトルを統計的に処理することにより準位密度を $10^6/\text{MeV}$ までのスケールで実験で調べることが可能になってきている。核子の無秩序運動は、核子の古典軌道が閉じない量子カオスを生むと考えられているが、まだほとんど手つかずの研究課題である。核子の秩序立った集団運動である巨大共鳴状態から、カオス的な複合核運動へと遷移する動的過程の解明が試みられている。

■ 直接反応の真の理解

原子核の運動や性質は、原子核と核子、あるいは原子核と原子核との反応によって調べられることが多い。これらの反応は核力によって引き起こされる。標的核と入射核は容易に励起され、また組み換えが起こり得ることから、その反応機構は極めて複雑なものとなる。どのような反応が起こるかは、反応する核種や入射エネルギーに強く依存する。そのダイナミクスを記述する理

コラム: 極端環境下での量子現象と宇宙の元素合成

物質の起源は人間が自然界に対して抱くもっとも基本的な問いのひとつである。宇宙に存在する多様な物質のうち、「元素」は身の回りの構材料として重要であるだけでなく、その生成過程が現場の物理環境に強く依存するため、さまざまな宇宙天体現象において「何が起きていたのか」を知るための優れた探索手段でもある。

宇宙に存在する元素の中で最も古いものは、宇宙開闢後 100 ～ 1000 秒の間に起きた「ビッグバン元素合成過程」、およびその後約 10 億年以内に生まれた「第一世代星」の内部での元素合成過程によって作られたと考えられる。宇宙構造形成のシミュレーションによれば、第一世代星の多くは太陽質量の数十から数百倍の初期質量を持っていたと予測されている。そのような恒星は非常に速く進化し、何らかの爆発現象とともにその一生を終えたはずである。しかし、現状で最古の元素の情報は、活動中の第一世代星から直接得られておらず、第一世代星で合成された元素が爆発により星間ガス中に放出され、それを材料として形成された第二世代星の表面元素組成から得られている。炭素から鉄の中重元素は第一世代星の進化の途上で順次合成され、鉄以上の重元素は超新星爆発や中性子連星合体などの爆発的天体現象で作られたと考えられている。一方、炭素よりも軽い元素のうち、特にリチウムは恒星内で合成されるメカニズムが無いため、ビッグバン元素合成の名残である可能性が高い。ところが現実には、中重元素については既存の恒星内元素合成シナリオが観測データを十分説明できているとは言い難く[1]、またリチウムについては観測値がビッグバン元素合成の予測値に比べて 1/3 以下しかない[2] (コラム「宇宙リチウム問題」参照) など、数々の重大な謎があることがわかってきた。第一世代星や、それに関連が示唆されているガンマ線バースト、連星系合体事象など、初期宇宙において主役を演じたであろう天体現象においてどのような元素合成過程が起きたかをつきとめることは、上記の謎を解き明かすための重要な鍵である。

大質量星の進化の詳細はよくわかっていないが、終末の爆発現象には温度、物質密度、重力場や磁場などに関して現在の天体からかけ離れた物理条件が伴っていたと考えられる。たとえば中性子星やマグネターの近傍では地球表面よりも 11 桁強い重力場や、人工的磁場よりも 6 桁強い磁場、通常の固体よりも 10 桁高い物質密度の出現が予想されている。そのような極端な物理環境が巨視的な空間・時間スケールを持つ背景場として作用する場合、元素合成を担うミクロな原子核反応はどのような影響を受けるのだろうか？ 地上の実験室でそのような極端環境を直接再現することは非常に難しく、人工的に発生可能な外場による効果は極めて微小である。しかし、エネルギー、運動量、時間、空間に関する超高分解能測定技術や、量子多体系に見られる量子増幅効果を利用し検出することで、それらの効果の“しっぽ”をつかまえられるだろうか？ もしそれが可能ならば、極端環境下での量子現象を扱う新しい理論的枠組みを打ち立てるための重要な足掛かりとなり、初期宇宙での元素合成過程、さらにはその舞台となる天体現象そのものを解明するための新たな窓が開かれるに違いない。

[1] T. Matsuno, W. Aoki, T.C. Beers, Y.S. Lee, S. Honda, *The Astrophysical Journal* 154, 52 (2017).

[2] W. Aoki, N. Tominaga, T.C. Beers, S. Honda, Y.S. Lee, *Science* 345, 912 (2014).

論が核反応理論である。近年の微視的反応理論の発展と計算機能力の向上により、原子核反応を記述する精度は格段に向上している。原子核の多くの実験研究では核反応を利用するため、実験データから有用な情報を引き出すためにも、定量的に信頼性の高い核反応理論が欠かせない。核構造の情報を引き出す手段を与えるのみならず、核反応に含まれる多彩な過程を微視的に理解し、予言能力をもって提示する枠組みを構築していくことが目標となる。

2.1.2 分野の現状

核物質の物性の理解を目標とする 5 つのテーマを進めるためには、原子核の基底状態や励起状態、および他の原子核との反応過程を精密に測定する実験手法が欠かせない。これらの実験を実現する手法は 1) イオンビーム、2) 電子ビーム、3) 光ビーム の 3 つに大別される。本章ではイオンビームによる実験研究を中心に解説している。測定手法では磁気スペクトロメータによる荷電粒子測定と半導体検出器によるガンマ線測定が中核となる。イオンビームによる原子核の励起状態の測定において日本の研究は世界的に群を抜いており、その基盤となっているのは大阪大学核物理研究センター（RCNP）の加速器と実験装置である。



図 2.2：左写真：大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロン加速器。右写真：高分解能スペクトロメータ「グランドライデン」（左）、クローバーガンマ検出器アレイ CAGRA (中央)、大スペクトロメータ LAS (右)。

RCNP は AVF サイクロトロンとリングサイクロトロンの 2 台の加速器を有し、核子あたり数 10 から数 100 MeV の高品質・高分解能イオンビームを供給することができる。高分解能磁気スペクトロメータ「グランドライデン」に代表される高性能検出器群を駆使して原子核反応の精密測定を行い、核物質の非圧縮率や対称エネルギーをはじめ核物質の研究において多くの成果を挙げた。「グランドライデン」によりエネルギー分解能 4×10^{-5} および散乱角 0° での散乱測定を実現したほか、偏極ビームの利用と散乱粒子の偏極測定、中性子の高分解能測定、クローバーガンマ線検出器アレイ（CAGRA）による γ 崩壊測定、アイソマー（準安定励起状態）測定などが世界的コラボレーションにより精力的に進められている。

国外でのイオンビームによる原子核の励起状態の研究は、オランダの KVI 研究所、米国のテキサス A&M 大学、南アフリカの iThemba 研究所などで行われている。電子散乱による原子核の励起状態研究は、主にドイツのダルムシュタット工科大学に限られているのが現状である。光ビ

ームによる研究は、日本のニュースバル、米国の HiγS 施設にて行われている他、ヨーロッパ共同の大強度光ビーム施設 ELI-NP がルーマニアにて建設中である。

次世代ガンマ検出器とされるトラッキング型のゲルマニウム検出器の大型アレイは、米国 (GRETINA) と欧州 (AGATA Demonstrator) において開発と実験が進められているほか、RCNP において GRETINA 型の検出器の開発が進められている。トラッキングを行わない従来型のゲルマニウム検出器アレイは多くの例があり、RCNP、東大 CNS、日本原子力研究開発機構、海外では ANL、オルセー、ユバスキラ、IMP、iThemba などに存在し実験に用いられている。

不安定核を対象とした原子核の励起状態を研究する実験では不安定核ビームを用いる方法が一般的であり詳細は不安定核 (第 3 章) に記載している。クーロン力による核励起とその崩壊測定や、標的と検出器が一体となったアクティブ標的を用いる手法、低エネルギーでの共鳴散乱測定などが行われている。日本では RIBF、RCNP、CNS、海外では米国 NSCL、ANL、ドイツ GSI、フランス GANIL を始めとする不安定核ビームラインが主体である。一方で、不安定核を標的とする高分解能軽イオン散乱測定が計画中である。比較的長寿命の不安定核をインプラントした標的を用いて、安定核と同じ手法で測定する計画 BRILLIANT が提案されており、RCNP を中心として開発が進められている。高分解能スペクトロメータとガンマ線検出器の組み合わせなど、新たな実験手法の開発を進めながら、精力的に研究が続けられている。

2.2.1 核力の理解

2.2.1.1 少数系、相互作用

■ 概要

原子核などの核物質の性質を理解するためには、構成要素である核子の間に働く力を理解することが欠かせない。このような粒子間に働く力を相互作用と呼ぶ。核子の間に働く相互作用は「核力」と呼ばれ、核子を構成するクォークの間に働く相互作用である「強い力」を源としている。核力研究の金字塔となる中間子交換理論は、湯川秀樹によって提唱された。湯川は「中間子」と呼ばれる質量 $100 \text{ MeV}/c^2$ 程度 (核子の質量の 10 分の 1 程度) の粒子が存在することを予言し、2 つの核子の間に中間子が交換されることで核力を説明した。実験的にによって最初に確認された中間子はパイ中間子であった。その後、核力研究は湯川の中間子交換理論を発展させる形で進む。1 ボソン交換模型がその代表例で、より重いロー、イェータ、オメガなどの中間子の交換も含めて核力を記述するものである。

現在の核力理論は、核子と核子との散乱データや重陽子の性質など、二核子から成る系の現象を揺るぎない精度で記述できる「現実的な核力」の域に達している。また、巨視的な原子核物質である中性子星の質量と半径の関係や中性子連星合体において生じる重力波の波形など、天体現象との一致を精密に議論できる様になってきた。一方で計算機の高速化を背景に、現実的な核力を用いて核物質の性質を厳密に計算する「第一原理計算」が可能となってきた。その結果、3 核子以上の原子核の構造や散乱は、二粒子の間で働く二体力のみでは正確に記述できず、3 粒子が

存在することで初めて働く三体力の効果が思いのほか大きい事が明らかになった。3 核子が関与する核子と重陽子の散乱の高精度データを 3 核子散乱を厳密に記述するファデーエフ理論計算と比較することで、三体力の最初の明らかな証拠が見つかった[1]。これをきっかけに、高精度測定が精力的に実施され、理論との直接比較により三体力の定量的な議論が進められている。現在では、三体力は原子核や核物質の性質を理解する上で欠かせない力であると考えられている。

核力が、その源となるクォーク間の強い力を記述する量子色力学とまだ直結していないという弱点もあるが、より小さい階層のクォーク・グルーオンの自由度から理解する試みは近年進展している。カイラル有効場理論による核力、格子量子色力学計算による核力計算など、量子色力学に基づく、あるいはそれを意識した核力研究が三体力も含めて進められている(第 4,5 章に関連話題)。

■ 最近の進展

近年、核力による原子核の理解と三体力の重要性は、3 核子散乱の枠を超え、様々な原子核や核物質にまで及んでいる。原子核構造の研究では、酸素同位体やカルシウム同位体の実験、理論の研究が進み、中性子過剰核の存在限界（中性子ドリップラインの決定）の決定には三体力が不可欠である、という結果が発表されつつある[2,3]。また、核反応の理論記述も進み、陽子・原子核散乱、原子核・原子核散乱の角度分布において有意な三体力効果が示唆されている(コラム三体力)。さらに、2016 年に発表されたテトラニュートロン(3-3-2-2 節)の理論的な記述においても、特にアイソスピン $3/2$ 三体力が重要な役割を果たすのではないかと、等の議論がされているところである[4,5]。

核子の無限系である中性子星においても核力による記述が行われている[6]。特に太陽質量 2 倍の中性子星の存在が発表された 2010 年以降、短距離斥力の 3 体力は欠かせないという考えが、研究者の中で定着している。

この様に核力によって統一的に原子核、核物質を記述し、理解しようという研究が展開されつつある。

■ 今後の計画

三核子力を含む核力の理解：特に荷電スピン依存性、高運動量成分の理解

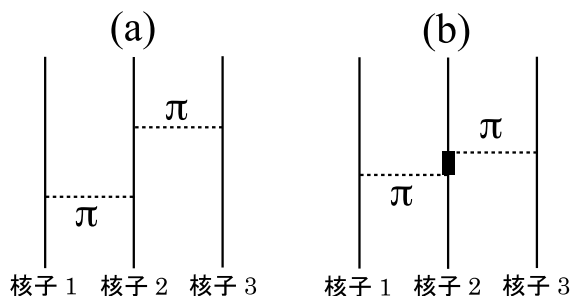
1) 三体力のアイソスピン依存性

核子 3 つの間に働く三体力には、アイソスピン $1/2$ と $3/2$ の 2 種類が存在する。三体力の性質、例えばスピンや運動量への依存性は、3 核子からなる系の散乱データを詳細に調べることで研究することができるが、関与するアイソスピンは $T = 1/2$ に限定される。一方で、中性子過剰核などの中性子が多い系の性質、中性子星など中性子が多く密度が高い系の状態方程式では中性子 3 つの間に働くアイソスピン $3/2$ の三体力が大きく寄与すると考えられている。アイソス

ピン 3/2 の三体力の性質を研究するためには、3 中性子状態や 3 陽子状態の測定、および軽い原子核の性質の中性子数依存性を系統的に調べる必要がある。

コラム：三体力

はたして原子核は 2 つの核子の間に働く核力（二体力）だけで理解できるのであろうか？ 原子核内では多くの核子が非常に小さい空間に閉じ込められていることから、多体力の効果は必ず存在すると考えられていた。実際、三体力の存在は 1933 年にウィグナーによって初めて提唱され、プリマコフらによって中間子交換理論に基づく三体力が発表されるなど、湯川によって中間子交換理論が唱えられた直後から議論されている。ここで三体力とは、3 つの核子の全ての位置あるいは運動量を使わなければ表現できない「ポテンシャル」として定義される。下図は 3 核子間に働く相互作用のファインマン図の例で、下から上に向かって時間経過する 3 つ核子の状態を実線で表している。点線はパイ (π) 中間子の交換を表す。核子状態の太線部分は核子が励起状態にある（内部クォークの状態が変化している）事を示している。(a) は核子 1 と 2 の間にパイ中間子が交換され、続いて核子 2 と核子 3 の間にパイ中間子が交換される過程を表している。この場合は、3 核子間の相互作用を二体力の繰り返しとして組み立てる事ができる。一方 (b) では、核子 2 が途中段階で励起状態になっているため、二体力の繰り返しとして表す事ができない。このような三核子間の相互作用が、三体力または三核子間ポテンシャルとして定義されるものである。(b) において途中の励起状態がデルタ粒子である場合の三体力は「藤田・宮沢型の三体力」と呼ばれ、三体力の主要成分と考えられている。



2) 三体力の高運動量領域の研究

三体力の存在は核物質の状態方程式に大きな影響を与える。特に中性子星内部などの高密度の状態では、三体力の高運動量での振る舞いが重要な役割を果たすと考えられている(2.2.4 節)。核子と重陽子の散乱は、散乱角度や入射エネルギーが大きいほど三体力の高運動量成分の寄与が大きくなると考えられ、系統的な測定が今後の研究において重要となる。近年の実験から、核子と重陽子の弾性散乱の大角度散乱では、エネルギーが高くなるほど藤田・宮沢型の三体力（コラ

ム:三体力参照)からのずれが大きくなることが明らかになっており、高運動量成分の理解の重要性が指摘されている[7]。

- [1] K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002). 関口仁子, 日本物理学会誌 **71**, 912 (2015).
- [2] T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 032501 (2010).
- [3] F. Wienholtz et al., Nature **498**, 346 (2013).
- [4] K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016).
- [5] S. C. Pieper, Phys. Rev. Lett. **90**, 252501 (2003); E. Hiyama et al., Phys. Rev. C **93**, 044004 (2016).
- [6] 例えば A. Akmal et al, Phys. Rev. C **64**, 1804 (1998); S. Gandolfi et al., Phys. Rev. C **85**, 032801 (2012) など.
- [7] K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C **89**, 064007 (2014).

2.2.1.2 媒質効果

■ 概要

原子核の理論モデルでは、原子核の構成要素を核子として、核子の間に働く相互作用を現象論的に導入することで、多彩な現象の記述に成功している。しかしながら、ハドロン物理(第5章)で説明されている様に、核子は現実には素粒子ではなくクォークとグルーオンからなる複合系である。核子は半径 0.8 fm 程度の有限な大きさを持つとともに、明確な表面を持たない雲のような「ぼやけた」存在である。また、原子核の核子密度は 10^{39} 個/cm^3 という超高密度であり、核子と核子の間の距離はたかだか 2 fm (1 fm は 10^{-13} cm)程度である。従って、図 2.3 に示すように原子核内で隣り合う核子の広がりやすさは重なり合っている。この結果、周りに核子が存在しない自由空間に比べ、原子核内では核子の性質が変化している可能性がある。このことを「媒質効果」

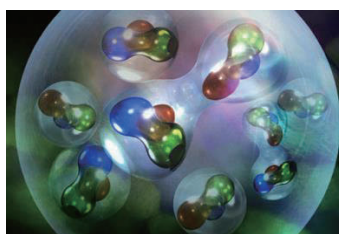


図 2.3: 原子核内の核子のイメージ図

と呼ぶ。周囲の空間を満たして影響を与える核子を「媒質」という言葉で表現しているのである。具体的には、媒質効果により核子内のクォークやグルーオンの分布が変わり、その結果として核子の半径や核子と核子の間の相互作用が変化することが予想されている。こうしたクォーク・グルーオンの変化のダイナミクスはクォーク・グルーオン系を記述する量子色力学の真の理解に不可欠である。

原子核が超高密度であることに伴うもう一つの媒質効果として、「原子核周辺の空間の変化」が挙げられる。空間の変化として理解される身近な例として重力がある。周りに星の無い宇宙空間は平坦であり、物体の運動は等速直線運動となる。近くに星があると、図 2.4 (a) に示すようにその周辺の空間が歪む。その結果、物体の運動は図 2.4 (b) に示すルーレットと同様に円運動となる。原子核の場合に働く力は強い相互作用であるが、周辺の核子の存在により空間（真空）が変化する可能性がある。重力の場合は空間の変化が運動の変化として現れた。原子核の場合は

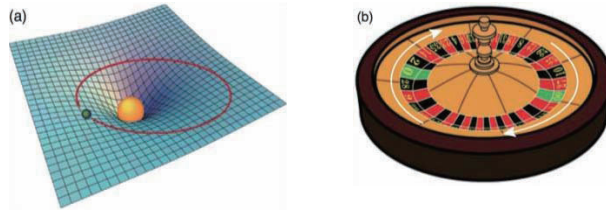


図 2.4： 重力による空間の変化と物体の運動に与える影響のイメージ図。

核子間の相互作用の変化として表れる。空間の変化に伴う媒質効果是我々の真空に対する概念とも深く関わっており、宇宙の成り立ちを理解する上で重要である。

■ 最近の進展

原子核の媒質効果に関する最近の研究として、EMC 効果[1,2]と、核力の媒質効果に対する荷電依存性の解明[3]が挙げられる。

EMC 効果とは「電子（レプトン）と核子内のクォークとの散乱確率が、核子が原子核内にある場合には減少する」という効果である。EMC 効果を表す量（EMC 指標）として、クォークが核子の運動量の 30-70%を担う領域での散乱確率の運動量依存性を取る。一方で標的を重陽子（ ^2H ）、ヘリウム 3（ ^3He ）、ヘリウム 4（ ^4He ）、炭素 12（ ^{12}C ）と順次変えることで、核子の周りの媒質密度を増やしていくことができる。EMC 指標を媒質密度に対してプロットすると、図 2.5 (a) の様に、媒質密度が上がるとともに EMC 指標が単調に増加する傾向、すなわち媒質密

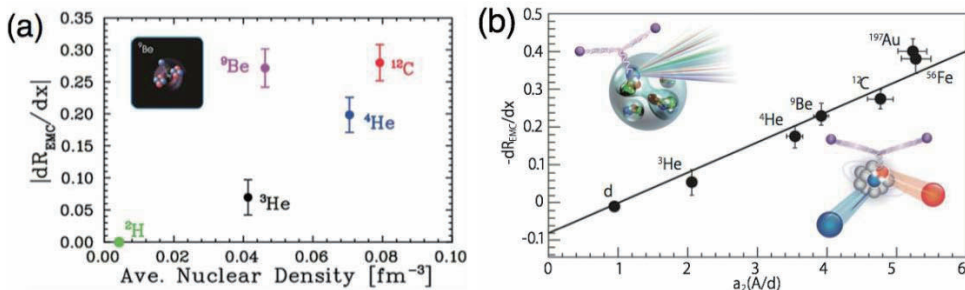


図 2.5： 左：原子核全体の平核子均密度と EMC 指標の相関。右：反応が起きている付近の局所核子密度と EMC 指標の相関。

度が上がると核子内のクォークが担う運動量の割合が減るという媒質効果を明瞭に示している。一方で、ベリリウム 9 (${}^9\text{Be}$) の媒質密度は ${}^3\text{He}$ と同程度であるにも関わらず、 ${}^{12}\text{C}$ と同程度の EMC 効果を示す。これは、 ${}^9\text{Be}$ が ${}^4\text{He}$ 2 個と中性子 1 個から成る 3 クラスター状態であり、全体の平均密度は中程度であったとしても、散乱は ${}^4\text{He}$ が主でありその周辺の媒質密度が高いため、と理解される。このことにより、原子核全体の平均密度ではなく、反応が起きている付近の「局所密度」が EMC 効果において重要であるということ分かる。また、EMC 効果と「2 核子相関」を関連付ける研究も進展している。図 2.5 (b) は EMC 指標と 2 核子相関係数の関係をプロットしたものである。 ${}^9\text{Be}$ を含めて綺麗な直線関係が認められる。この結果は、原子核内で相関を持った 2 核子のクォーク分布が変化しており、その変化が「局所密度」に依存することを示唆している。

核力の媒質効果として、原子核内での陽子-陽子散乱である $(p, 2p)$ 反応の偏極分解能に明確な密度依存性が観測されているが (図 2.6 (a) 参照)、最近アイソスピンの異なる陽子-中性子散乱である (p, pn) 反応のデータが得られた。 $(p, 2p)$ 反応の場合とは異なり、陽子前方と中性子前方の 2 つの場合がある。この内、陽子前方の場合 (図 2.6 (b)) は $(p, 2p)$ 反応と同様の密度依存性が認められたが、中性子前方の場合 (図 2.6 (c)) は依存性が認められなかった。これらの測定では、核力を生じる際に交換される中間子の電荷が異なっている。つまり、中間子の電荷によって媒質効果が異なる (中性の場合に媒質効果が大きい) こと、すなわち対称性の破れが媒質効果において観測されたことを示す重要な結果である。

核力の媒質効果に関しては、 (p, pn) 反応での偏極移行量の測定が予定されており、媒質効果の中間子依存性に対し関してより詳細な情報が得られることが期待される。また、偏極移行量の完全測定を通して、原子核媒質中の核力の変化を実験によって決めることも検討されている。

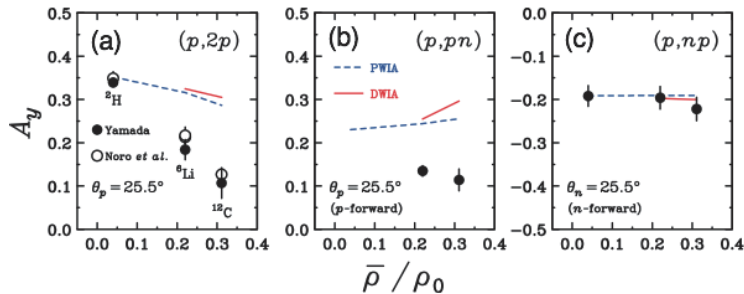


図 2.6 : 偏極観測量と核子密度の相関の実験値 (黒丸) と理論予測 (実線、破線)。

EMC 効果と 2 核子相関に関しては、米国トーマスジェファーソン研究所において、12 GeV にアップグレードされた電子ビームにより、精度をさらに上げた実験が広範囲な原子核に対して行われる予定である。また、相関に関与している粒子の同時測定も計画されており、EMC 効果と 2 核子相関の統一的理解が得られると期待される[4]。

[1] J. Seeley et al., Phys. Rev. Lett. 103, 202301 (2009).

[2] L. B. Weinstein et al., Phys. Rev. Lett. 106, 052301 (2011).

[3] T. Wakasa, K. Ogata, and T. Noro, Prog. Part. Nucl. Phys., submitted.

[4] The 2015 Long Range Plan for Nuclear Science (2015).

2.2.2 極限原子核の物性

2.2.2.1 高スピン・高変形

■ 概要

原子核は孤立した有限多体系であるため、原子核ごとに「形」をもつ。孤立系であるため外場が形を規定することがなく、核子自身が自分たちの分布の形を決める。原子核を古典的な液滴であると考え、表面張力によって球形が唯一安定な状態となるが、実際の原子核はむしろレモン型の四重極変形をしているものがほとんどであることが分かっている。この事実からも分かるように、原子核の変形は量子効果である。原子核の平均場は近似的に調和振動子型と考えることができるが、球形では特に高い対称性を持ち、エネルギースペクトルに強い縮退、すなわち殻構造が現れる¹。殻の途中まで核子を詰めた場合、基底状態近傍に縮退した状態が多数作られる。この系が球形状態から対称性を破り変形すると縮退が解けてエネルギーが分岐し、少なくとも1つは球形状態よりも安定化する²。一つの殻を埋め尽くした場合にはエネルギーが上がる軌道と下がる気道で相殺し、この効果は働かない。一粒子状態の殻を埋め尽くす核子数はすなわち魔法数であり、確かに陽子数もしくは中性子数が魔法数の原子核である魔法核の基底状態は球形である。

原子核が変形するという事は、回転対称な空間に浮かんでいるにもかかわらず特別な方向を変形軸として選んだということであり、回転対称性を自発的に破ったことを意味する。自発的に対称性が破れた状態は無限系ではハミルトニアン固有状態として実現しうる（例えば強磁性体）が、原子核のような有限系の場合ハミルトニアンの固有状態とはなり得ず、そのまま量子準位として発現することはない。その代わり、対称性の破れた状態を回転させながら一次結合をとり、角運動量の固有状態となるようにすることで再び対称性を回復し、現実の原子核準位を形成する。一次結合の取り方を選ぶことによって、一つの変形状態から様々な角運動量を持つ準位の一群が生成される³。この回転バンドと呼ばれる状態の一群は多くの原子核で観測されており、原子核が変形していることの強い証拠の一つである。

¹ 殻構造には通常の意味での形状だけではなく、平均場の動径方向の形も強く関係している。その平均場中の運動の古典軌道が閉じている場合に縮退が生まれるということが分かっている。 r の冪で表される中心力ポテンシャルで古典軌道が閉じるのは r^1 と r^2 の場合だけであるが、前者は原子中の電子の感じるクーロン力であり、後者は原子核の平均場に対応している。この2つの関数系が自然界に存在する二つの多体系を支配する力であることには自然の美しさを感じる。

² この効果は多原子分子におけるヤンテラー効果と同じである。

³ この回転バンドは素粒子論の南部-ゴールドストーンモードに対応する。エネルギー（質量）が有限であるのは系が有限であるからである。

このように、変形とそれに伴う回転は、孤立した自己束縛有限量子系であるために現れる原子核を特徴づける現象であり、核構造研究の柱の 1 つである。原子核にはどのような形状が発現し、どのようなダイナミクスを引き起こすのか、高速回転は原子核構造にどのような影響を及ぼすのか。近年の加速器の進化は、核構造研究の場となるアイソスピン領域や質量領域の飛躍的拡大をもたらしつつあり、検出器技術の発展と相まって、これまでに実現できなかった大変形、高スピンといった極端な環境下での研究を可能にし、核構造研究に大きな局面の変化をもたらそうとしている。

■ 最近の進展

3) 超変形

原子核が変形すると幾何学的対称性がいったん悪くなるが、短軸と長軸の長さの比が 1:2 に至ると再び対称性はよくなる⁴。この変形が持つ空間的対称性に起因した縮退によって魔法数が生まれ、その変形魔法数に一致した中性子数や陽子数をもつ原子核は安定であり「超変形」と呼ばれる。超変形魔法数は図 2.7 のように予測され、確かにその領域に、予測された通りの強い変形状態が見つかっている。同じ機構が短軸と長軸の長さの比が 1:3 の変形状態（ハイパー変形と呼ばれる）にも現れるはずであるが、まだ見つかっておらずその探索は今後の大きな課題である。

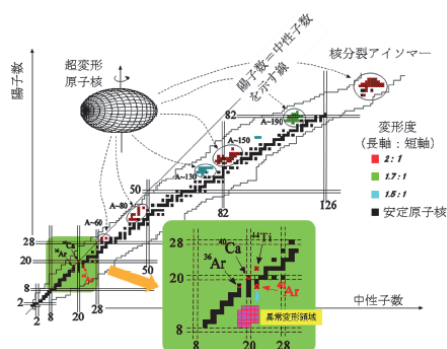


図 2.7 これまでに発見された超変形原子核。緑の領域は最近発見された質量数 40 領域の超変形原子核を示す。

⁴ 短軸と長軸の比が 1:2 の三次元調和振動子の古典運動を考えると、長軸方向に 1 周する間に短軸方向に 2 周するとちょうど周期が合い、8 字型の軌道を経てもとの場所に戻ってくることから古典軌道が閉じるということが理解できる。

4) 高スピン状態

超変形のパンドヘッド状態（変形バンドのうち最もエネルギーの低い状態）は励起状態であることが多い。無数にある他の励起状態に埋もれており、そこからのガンマ遷移は多くの状態に分散するため、一部の例外を除いて観測することは非常に難しい。ところが、超変形状態に回転を与えていくと、同じ角運動量の状態の中で最もエネルギーの低い状態（イラスト状態：図 2.8）になる。超変形状態の慣性率率が通常変形

のそれよりも大きく、エネルギーをあまり与えることなく角運動量を増加させることができるからである。イラスト線（イラスト状態を結んだ線）に行き着いた原子核はイラスト線に沿って遷移するため、ガンマ線強度が集中する。それらのガンマ線を大型ガンマ線検出器アレイで同時計測することで、大量のバックグラウンドのなかから超変形状態由来のガンマ線を測定することが可能となった。

高スピン状態は超変形状態をイラスト状態にまで引き下げるための要請でもあるが、同時に、その中で運動する核子運動との結合という観点でも興味深い。高スピン状態の回転は我々の宇宙で最も速く、その周波数は 10^{19} から 10^{20} Hz におよぶ。その回転の中で運動する核子は強力な遠心力とコリオリ力を受け、原子核はもはや剛体と見なすことができなくなり、内部状態の遷移が起こる。その代表的な現象であるバックベンディングは、コリオリ力により超流動を成すクーパー核子対が壊れスピンを整列させる現象である。これにより慣性モーメントが増加し、同じ角運動量で相対的に安定化する。角運動量が大きくなり壊れるクーパー対が増えるとともに超流動状態から常流動状態に相転移を起こすと考えられおり、その兆候は ^{40}Ca などで見つかっている。

5) エキゾチック変形

エキゾチック四重極変形

原子核の変形の最低次は四重極変形である。軸対称な四重極変形にはレモン型のプロレート変形とミカン型のオブレート変形がある。どちらも同程度の割合で発現しているようなものにもかかわらず、実際に観測される変形はほとんどがプロレート変形である。なぜ原子核がプロレート変形を好むかという問題は、原子核変形の基本的問題として長く議論されているにも関わらず、未解決の問題である。

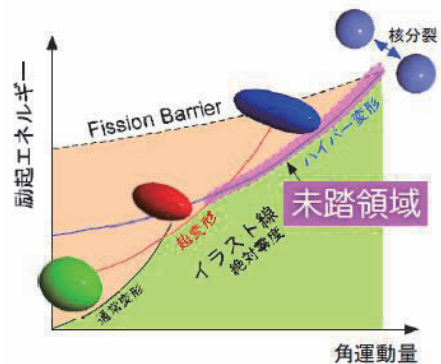


図 2.8 角運動と励起エネルギー

四重極変形で対称性を一つ下げたものにキーウィフルーツ型の非軸対称（三軸非対称ともいう）四重極変形がある。理論的には多くの原子核で発現することが予測されているが、実験で明確になっている状態はわずかである。

八重極変形

四重極変形の次に現れるのは八重極変形である。八重極変形には磁気量子数 $m=0, 1, 2, 3$ に対応して、洋なし型、バナナ型、正四面体型、三角おむすび型がある。回転対称性だけでなく、パリティ対称性も破っているため、現実の原子核ではパリティ対称性を回復させた状態がダブルレットとして現れることになる。これはレーザーの共鳴に使われるアンモニア分子のインバージョン・ダブルレットと物理的には同じものである。これまでに $m=0$ の洋なし型変形核は見つまっているが他の八重極変形核の探索は今後の課題である。

変形共存と変形進化

変形共存とは、1つの原子核で、球形、オブレート型、プロレート型、三軸非対称変形などの複数の異なる変形状態がほぼ同じ励起エネルギー領域に存在する現象を指す。 ^{40}Ca は球形の二重魔法核であり基底状態は球形であるが、約 5 MeV の励起状態に超変形状態が発見された。原子核の束縛エネルギーは数百 MeV から数 GeV にも達するが、内部状態の非常に異なる状態が数 MeV のエネルギー差で存在するということが驚きである。

変形進化とは、中性子数や陽子数が変化するにつれて、また、スピンの大きくなるに従って、原子核の形が球形からプロレート型などへ変形する一連の現象を指す。氷から水への相転移現象に似たミクロな原子核の世界での量子相転移現象であるとも考えられる。中性子の増加に伴い、アイソスピンに依存した核子間相互作用によって殻構造が変化しすることが原因と考え等得ている。 ^{32}Mg 近傍の原子核は中性子数 20 の魔法数が消失し、球形状態の変形状態が反転した「反転の島」といわれる領域を形成するが、反転の島の境界に位置する ^{31}Mg では3つのプロレート変形の回転状態と球形の変形共存が観測された。相転移領域近くの原子核では2相共存、すなわち変形共存が普遍的に起きているかもしれない。

■ 今後の計画

加速器や測定器の性能の飛躍的な進化のため、原子核の形状と高速回転の研究は大きな進展を遂げる局面にある。大強度の不安定核ビームや、低速不安定核ビームや高スピン状態のアイソマー(長い寿命を持つ励起状態)ビームのさらなる進展により、広い質量領域、かつ、低エネルギーの高スピン状態を生成できるようになりつつある。

エキゾチック変形状態の研究ではガンマ線検出器の感度が死命を制する。日本においても次世代ガンマ線検出器であるガンマ線トラッキング検出器アレイ (図 2.9) の開発が進んでおり、これまで観測できなかった微弱なガンマ線を高い信号雑音比で検出し、変形状態やその運動状態の研究が可能となる。

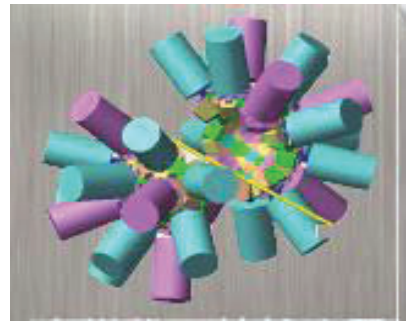


図 2.9 トラッキング型次世代ガンマ線検出器。

6) 変形の極限と高スピンの極限 — 高速回転するハイパー変形核の探索

変形の極限の研究は超変形核からハイパー変形核へと移行する。短軸と長軸の長さの比が 1 : 3 という幾何学的対称性によって安定化するハイパー変形状態の存在が理論的に予想されている (図 2.10)。球形から大きく変形したこの状態は、束縛の極限にあると考えられており、これまでにない大きな変形と付随する量子現象の探索が今後の計画の大きな柱の 1 つである。

超変形やハイパー変形状態は核分裂と強い関連がある。核分裂は表面張力によって作られるポテンシャル障壁を通過する多体のトンネル効果である。その過程で超変形やハイパー変形状態を通過するため、その高さや変形度は核分裂の経路を大きく左右する。また、球形状態、超変形状態、ハイパー変形状態という内部状態の全く異なる状態間の遷移を系統的に測定できれば、核分裂を記述する上でも難解な原子核物理に長く課せられた問題の解決への糸口となる。

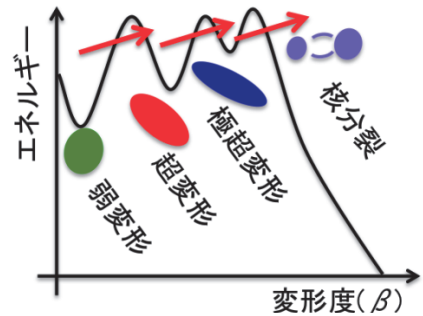


図 2.10 変形度とエネルギーの関係

ハイパー変形核がイラスト状態として観測されるとすれば必然的に高スピン状態である。回転運動は数学的には磁場と等価であることから、角運動量が大きくなるにつれてクーパー核子対が壊れ、臨界角運動量 (臨界磁場) を超えると超流動状態が通常状態に遷移すると考えられている。また、高速回転する原子核はもはや剛体ではあり得ず、オブレート型からプロレート型に急速に遷移するヤコビ形状遷移も予想されており、ハイパー変形状態はヤコビ遷移の終端に存在するとも考えられている。

7) エキゾチック変形

三軸非対称変形

非軸対称変形はそれ自体が興味深い変形であるが、それに伴って奇抜な運動が誘起される点でも注目されている。その一つに、カイラルバンドがある(図 2.11)。非軸対称変形は三つの慣性主軸が区別され、それぞれの軸に中性子の一粒子運動、陽子の一粒子運動、集団運動の角運動量が関係づけられると、右手系と左手系の縮退したバンドが現れる。この縮退したバンドが対称性を回復させることで現れるのがカイラルバンドである。

非軸対称な剛体が回転する際、軸対称剛体のように回転軸が安定しておらず、回転軸自体が不安定になる。この回転の量子運動が原子核のウォブリング振動として発現することが予測されている。

八重極変形

磁気量子数 $m=0, 1, 2, 3$ に対応して、洋なし型、バナナ型、正四面体型、三角おむすび型の八重極変形が数学的には可能であるが、これまでに洋なし型しか見つかっておらず、他の形状の探索が課題である。八重極変形を作るためには一粒子状態のスペクトルに $\Delta I=3$ で結ばれる状態の対が近接して存在する必要がある⁵。この対は互いにパリティが異なるため、調和振動子ポテンシャルでは近接することがなく、スピン・軌道相互作用により異なる殻の状態(intruder 状態)が混入する必要がある。そうした状態付近にフェルミ面があるという特殊な条件のもとで八重極変形の探索が行われている。

一方で、超変形状態では球形状態では異なる殻に属する状態が入り交じっており、様々な八重極変形状態が発現する素地が整っている。超変形状態に結合した八重極変形はより普遍的に存在している可能性があり、

8) 変形共存と変形進化

変形共存は量子的変形ともいえる新しい概念の変形を生むことが分かってきている。原子核を変形させるのは量子力学的効果であるが、ひとたび変形が生じ安定化した場合には古典的な物体としての描像がよく成り立つことが多い。このいわば古典的変形状態がポテンシャル障壁で隔てられて複数存在する場合、多体トンネル効果で混合する変形混合状態を形成する。連続的に変形した状態が混合する大振幅振動状態がある可能性もある。内部状態が全く異なる状態がマクロ

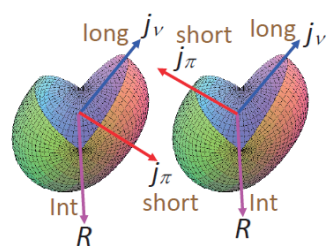


図 2.11 カイラルリティに関する模式図。 j_v^{π} , j_{π}^{π} , R は最外殻の中性子と陽子の角運動量、コア

⁵ これは同じパリティの状態間の相関で発現する四重極変形とは対照的である。原子核は同じパリティを持つ状態がバンド構造をなすため、殻内で四重極相関をもつための状態の組み合わせが多数あり(s 軌道を除き、同じ j の状態間ですらい)、魔法数以外のあらゆる核子数で四重極変形が生まれる条件が整っている。

な運動で混合するという量子多体系を考える上で、非常に難しく、非常に面白い系であり、原子核物理の長年の難問である核分裂のダイナミクスを解く鍵ともなることを期待している。

2.2.3 原子核の多様な相の起源

2.2.3.1 原子核におけるクラスター構造

■ 概要

多くの原子核では、核子が平均ポテンシャルの中を独立に運動していると考えられる独立粒子模型が良く成り立っている（図 2.12 左）。しかし、ある種の状態は独立粒子模型では説明できず、原子核内のいくつかの核子が集合してクラスターを生成し、クラスター同士が相対運動していると考えられるクラスター模型でなければ説明できない「クラスター状態」（図 2.12 右）であることが知られている。独立粒子的な状態からクラスター状態への変化はある種の相転移であり、クラス

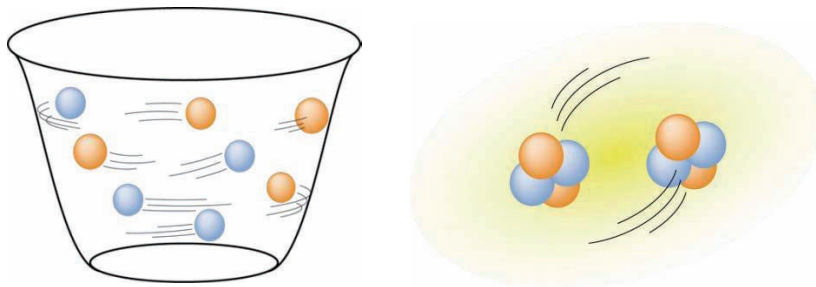


図 2.12：独立粒子描像（左）とアルファクラスター描像（右）

ター状態の構造やその発現と消失の機構を調べることは、量子多体系である原子核のダイナミクスを明らかにすることに他ならない。密度の飽和性のため、少しの系のエネルギー変化によりクラスター状態が発現することは原子核物質の特徴的な性質の 1 つである。

原子核に現れるクラスター構造のなかでもっとも重要な役割を果たすのは、陽子 2 個と中性子 2 個が集まって構成される α 粒子 (${}^4\text{He}$) による α クラスターである。 α 粒子は高い結合エネルギーを持つ安定な原子核であるため、原子核中でクラスターとして析出しやすく、特に ${}^{12}\text{C}$ や ${}^{16}\text{O}$ の様な陽子数と中性子数が同じでかつ偶数である原子核 ($4N$ 核) では、 α クラスター状態が現れやす。例えば ${}^{12}\text{C}$ の 7.65 MeV にある励起状態 (0_2^+ 状態) は、3 つの α クラスターからなる典型的なクラスター状態である。近年、この状態は通常の原子核より半径が大きく、密度が 1/5 程度しかない希薄なクラスターガス状態であると理論的に指摘されている。通常の原子核では、種類に依らず密度がほぼ一定であると考えられており、予言されているような希薄な状態が存在するかどうかはとても興味深い。ゆえに、これを実験的に確かめることは重要な研究課題となっている。

一方、 $4N$ 核でない原子核のクラスター状態についても研究が行われている。 α クラスター状態に中性子や陽子を付加すると、余分な核子が α クラスター同士を結びつける共有粒子として振る舞い、クラスター分子状態が形成されることが理論的に指摘されており、実験による探索が行われている。

α クラスター状態は、原子核物理の観点だけでなく、宇宙核物理の観点からも重要である。私たちの身の回りにある元素は、すべて宇宙における核反応によって作られたと考えられている。宇宙に存在する元素の 98% は宇宙誕生直後に生成された水素と ${}^4\text{He}$ であるので、その後の恒星内の元素合成過程では、軽い元素が陽子と ${}^4\text{He}$ を吸収して重い元素に変化する反応が重要な役割を果たす。 ${}^4\text{He}$ を吸収する反応では、中間状態として α クラスター状態が生成されるため、宇宙における元素合成過程を理解するには α クラスター状態を研究する必要がある。

■ 最近の進展

従来、クラスター状態の探索は共鳴散乱やクラスター移行反応を用いて行われてきた。図 2.13 (a) と (b) に示すように、共鳴散乱では入射粒子と標的粒子が共鳴状態をつくることでクラスター状態が生成され、クラスター移行反応では入射粒子から標的粒子へとクラスター粒子が移行されることでクラスター状態が生成される。しかし、これらの手法は三つ以上のクラスターからなる多体のクラスター状態を生成するには、必ずしも有利ではない。近年、図 2.13 (c) に示すような非弾性散乱による単極子励起でクラスター状態を励起するという手法が提案され広く実施されるようになってきた。非弾性散乱では、入射粒子から標的粒子に内部エネルギーを与え、標的粒子を励起する。それゆえに、非弾性散乱は、クラスター状態以外にもいろいろな構造を持つ状態を励起してしまう反応であるが、多体のクラスター状態を励起することも可能である。精密な測定によって、標的核に内部エネルギーだけを与えて角運動量を与えない単極子励起のみを抽出することで、クラスター状態を調べることができる。 ${}^{16}\text{O}$ や ${}^{24}\text{Mg}$ 、 ${}^{13}\text{C}$ 、 ${}^{28}\text{Si}$ などの原子核に対する実験が行われている。

また、 ^{12}C については本当に 0_2^+ 状態が半径の大きい希薄なクラスター状態であるかを明らかにする試みがなされている。原子核の半径を測定するには、測定対象となる原子核に別の原子核や電子を衝突させて弾性散乱する確率を測定する手法が一般的である。図 2.13 (d) に示すように、弾性散乱では散乱の前後で標的粒子の状態が変化しないので、標的粒子の半径を正確に測定することができる。しかし、 ^{12}C の 0_2^+ 状態は極めて寿命が短く、この状態を標的粒子として弾性散乱を測定することはできない。その代わりに、 ^{12}C の基底状態から 0_2^+ 状態を励起する非弾性散乱を測定して半径を決定する試みがなされているが、非弾性散乱の確率は励起状態の半径には必ずしも敏感ではないという指摘もなされており、結論には至っていない。しかし、 0_2^+ 状態が希薄なクラスターガス状態であることの間接的な証拠は得られている。 0_2^+ 状態が希薄なクラスターガス状態であると予測するクラスター模型は、 0_2^+ 状態を構成する 3 つの α クラスターの相対運動が励起すると 2_2^+ 状態が現れると予測しており、この状態を探索する試みが世界中でなされてきた。長きにわたる探索を経て、近年、大阪大学核物理研究センターにおける精密測定によって、この 2_2^+ 状態が遂に発見された。この発見は、クラスター模型が ^{12}C 原子核の構造を正しく記述することを示しており、 0_2^+ 状態がクラスター模型の予測通り、大きな半径を持つ希薄なクラスター状態であることを間接的に証明している。

α クラスターが関与した宇宙核反応率の測定も行われている。我々の宇宙は、いまから約 140 億年前に「インフレーション」と、それに続く「ビッグバン」によって始まったと考えられているが、このビッグバン模型によって予測されるリチウム (^7Li) の生成量が観測量に比べて 3 倍も大きいという「宇宙リチウム問題」は謎のまま残されている。この謎を解くための一つの仮説として、 ^7Li の材料となる ^7Be が中性子と衝突して二つの α クラスターに分解する反応が起こっているのではないかと提案されていた。しかし、大阪大学核物理研究センターにおける世界初の測定の結果、この反応が起こっている確率は小さく、この仮説で「宇宙リチウム問題」を解決することができないことが明らかになった（コラム：リチウム問題の鍵となる原子核反応率の測定）。

■ 今後の計画

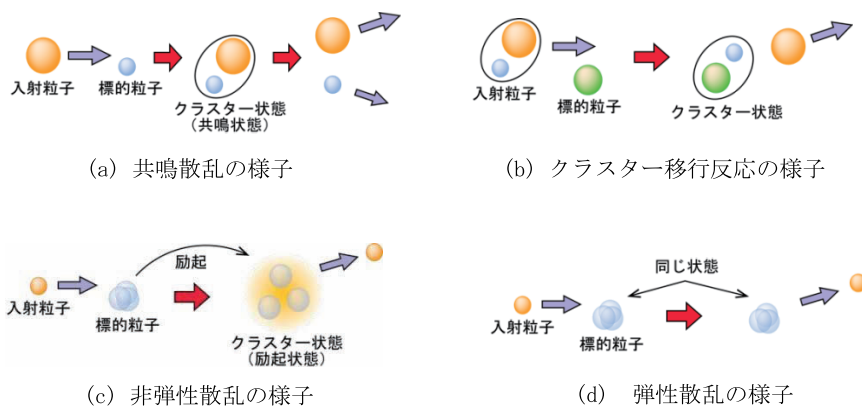


図 2.13：クラスター状態探索に使われる種々の反応

^{12}C の 0_2^+ 状態以外の重い $4N$ 核や、 $4N$ 核以外の原子核においても希薄なクラスターガス状態が存在するののかという重要な問いについての研究を展開する。理論的には ^{40}Ca よりも軽い $4N$ 核には希薄なクラスター状態が存在すると予測されているが、実験的には確認されていない。

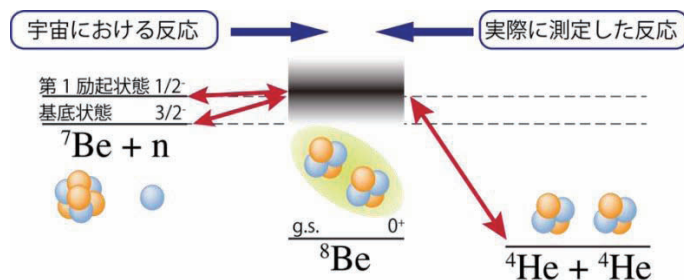
^{12}C だけでなく、多くの原子核で希薄なクラスターガス状態が普遍的に存在するという事は、低密度の核物質においてクラスターガス状態が現れる有力な証拠となるため、これを探索するためにいくつかの方法が提案されている。（コラム：希薄なクラスターガス状態を探索する。）

また、中性子と陽子の数のバランスが大きく崩れた原子核におけるクラスター状態の探索も進められている。これらの原子核においては余剰な核子がクラスター間の共有粒子として振る舞い、クラスター分子を形成するなど、新しいタイプのクラスター状態が現れると考えられている。

コラム：リチウム問題の鍵となる原子核反応率の測定

「宇宙リチウム問題」はビッグバン理論に残された重大な謎として、世界中の研究者の注目を集めている。この問題の解決策として、恒星の進化理論の見直しや、超対称性粒子という未発見の粒子の存在に原因を求める様々な仮説が提案されているが、いまだに解決されていない。原子核物理学の観点からは、ビッグバン理論に使われている原子核反応率を精密に測定することが強く求められている。

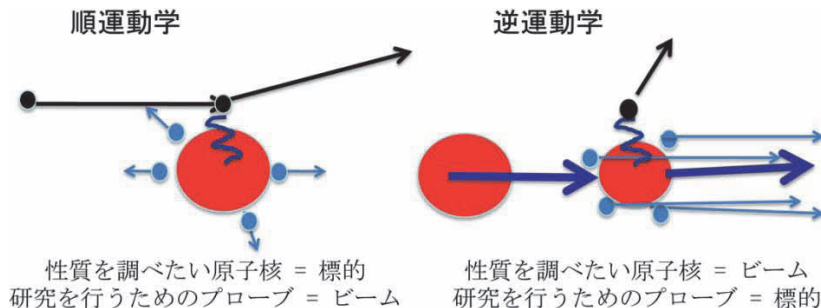
ビッグバン元素合成において ^7Li は、 ^7Be という短寿命の原子核が崩壊して出来たと考えられている。 ^7Be を生成する反応の確率は、すでに十分な精度で測定されている。一方で、 ^7Be が ^7Li に変化してしまう前に、 ^7Be が他の原子核に崩壊していたとしたら、 ^7Li の生成量が減少していることを説明できる。 ^7Be の崩壊を促進させる有力な反応として、 ^7Be に中性子が衝突して二つの α 粒子 (^4He) に崩壊する反応 $^7\text{Be} + n \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ が重要視されていたが、 ^7Be が短寿命の原子核であるため、これまでビッグバン元素合成に関連する反応エネルギーでこの反応の確率が測定されたことはなかった。



近年、ある反応が起こる確率を知るためには、逆方向に進む反応の確率を測定すれば良いという「詳細釣り合いの原理」にもとづき、逆方向の反応 $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Be} + n$ の確率を測定することで、初めて宇宙で起こっている $^7\text{Be} + n \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ 反応の確率が測定された。その結果、 ^7Be が崩壊して二つの α 粒子に変化している確率は小さく、宇宙リチウム問題の謎はますます深まることとなった。

コラム： 希薄なクラスターガス状態を探索する

希薄なクラスターガス状態の中では、たくさんの α クラスターが低いエネルギーで比較的自由に相対運動していると考えられている。そのような状態が崩壊する場合には、低エネルギーの α 粒子をたくさん放出すると予想される。一方で、通常の状態は、核子など少数の高エネルギー粒子を放出して崩壊しようとする傾向がある。そこで、励起状態からの崩壊粒子を測定することによってクラスターガス状態と通常の状態を判別する実験が計画されている。



研究対象の原子核を励起して、そこからの崩壊粒子を測定するには順運動学を用いる方法と逆運動学を用いる方法がある。順運動学の手法では、 α 粒子や陽子など測定手段（プローブ）となる粒子をビームとして使い、研究対象となる原子核に衝突させてこれを励起させる。この手法では、散乱されたプローブ粒子を測定することにより、調べたい原子核の励起エネルギーを高精度で知ることができる。しかし、励起状態から放出される粒子は広範囲の角度に放出されるため、崩壊時に放出される粒子を捕まえるためには、標的の周りを取り囲む大量の検出器を用意しなければならない。一方、逆運動学の手法では、研究対象となる原子核をビームとして使い、標的であるプローブ粒子に衝突させる。この手法では、調べたい原子核の励起状態が高速で運動しながら崩壊するので、放出された粒子がビーム方向に集中し、測定に使う検出器が小さくて済むという特長がある。しかし、調べたい原子核の励起エネルギーの精度を上げることは難しくなる。

二つの手法にはそれぞれに利点と欠点があるが、これを克服するために、時間射影型検出器（TPC: time projection chamber）と大阪大学核物理研究センターが誇る超高分解能磁気分析器である **Grand Raiden** を組み合わせた、順運動学による実験が計画されている。TPC は標的から全方向へ放出される粒子を測定できる。**Grand Raiden** を使って研究対象となる原子核の励起エネルギーを高精度で測定しつつ、順運動学の欠点である測定器の大きさの問題を解決することが可能になると期待されている。

2.2.3.2 多様な集団運動の発現とその機構の解明

■ 概要

原子核を構成する核子は、核内を自由に運動することで一粒子運動を作り出す。その一方で、

多数の核子が関与する集団的な運動モードが現れることも、原子核構造の大きな特徴の一つである。微視的理論の立場では、核子間相互作用によって作られた平均場中を核子が独立して運動し（一粒子運動）、その運動が平均場に揺動をもたらす。平均場自体が変化することで、多くの核子に規則性がある運動、すなわち集団運動が生み出される。一粒子運動は、また平均場の変化を感じて影響を受ける。したがって、一粒子運動と集団運動とは非線型的な関係にあり、さらに対相関（超流動性）や変形相関など多様な多体相関が存在することが、原子核に多彩な相構造が現れる要因である。

振動に対応する集団的運動には、大きく性質の異なる二つのタイプが存在する。一つは、「巨大共鳴状態」であり、もう一つは「低励起振動状態」である。巨大共鳴状態は、無重力空間に浮かぶ液滴のように、原子核の表面が振動する古典的なイメージに対応する。いかなる原子核にも存在することから、対称エネルギーや圧縮率などの核物質の性質を反映したものでもある。巨大共鳴には多くの種類があり、軌道角運動量、スピン、アイソスピン、全角運動量などにより分類される。特に、アイソスピンで陽子群と中性子群の振動を区別し、陽子と中性子が同じ方向に動く振動を「アイソスカラー型」、逆方向に動く振動を「アイソベクトル型」と呼ぶ。代表的な巨大共鳴に、アイソベクトル型の巨大双極共鳴 (GDR)、アイソスカラー型の巨大四重極共鳴 (GQR) がある。また、形を変えない膨張・収縮に対応し、核物質の圧縮率の情報を与える巨大単極共鳴 (GMR) は、天体物理への応用においても重要な研究対象である。並んで、中性子を陽子に変化させると同時に核子のスピンの向きも反転させるガモフ・テラー巨大共鳴 (GTGR) も活発な研究が行われている。

一方の低励起振動状態は、フェルミ面付近の一粒子状態の波動関数に支配された、純粋に量子力学的な状態である。物性物理におけるソフトモードに対応し「相転移」に伴って現れる。よく研究されている状態は、スピン・パリティ 2^+ の四重極振動状態である。核子数が魔法数からわずかに離れると集団的な振動モード（フォノンの励起モード）が現れる。さらに、魔法数から離

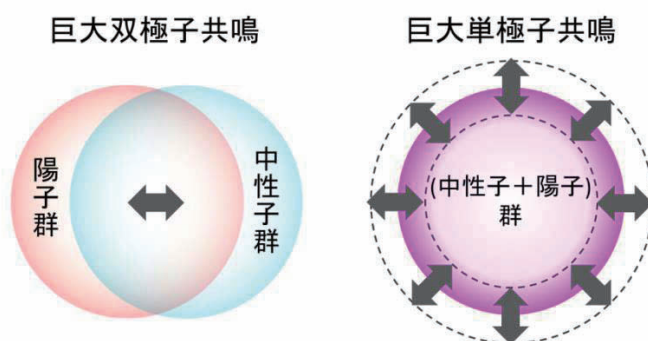


図 2.14：左：中性子群と陽子群が逆位相で単振動をする巨大双極共鳴状態の模式図。右：中性子群と陽子群が一緒になり（同位相）、半径つまり体積を変化させる巨大単極共鳴状態の模式図

れフォノンが凝縮した四重極変形相に「相転移」するとき、その前駆現象として 2^+ 状態のソフト

化が観測される。

また、複数の平衡平均場解がエネルギー的に近接している場合には、それらを跨がる変形共存／変形混合などの大振幅の集団運動が生まれる。複数の真空（相）が混ざり合うのは、原子核が有限系であることの特徴であり、その混ざり具合を調べることは量子力学多体問題の大きな難問である。

回転に対応する集団運動も、原子核における基本的な集団運動である（「極限原子核の物性」を参照のこと）。現実世界の原子核では、振動運動と回転運動が同時に起き、多様な励起スペクトルが現れる。

■ 最近の進展

巨大共鳴状態は、原子核の外場に対する応答を通して調べることができる。理論的には、相互作用から出発して自己無撞着に平均場を作り、さらに同じ相互作用を用いて平均場の時間的な振動を記述する乱雑位相近似（RPA）法が標準的な枠組みである。最近では、時間依存原子核密度汎関数法の枠組みでの線型応答を通して、開殻の原子核、すなわち核子が超流動状態にあり、かつ任意の核変形をしている場合にも、巨大共鳴状態が微視的に記述できるようになってきた[1, 2]。更にガモフ・テラー励起のような荷電交換を伴う巨大共鳴状態に対しても、超流動性と核変形を考慮に入れた密度汎関数計算が可能になってきた[3,4,5]。

巨大共鳴の実験研究では、散乱反応等により原子核を「揺さぶって」刺激を与え、集団振動のきっかけをつくるのが一般的である。概要で述べたように、共鳴の強度分布から核物質の理解に有用な情報が抽出される。不安定核ビームの開発、逆運動学測定手法の進展に伴い、安定核から離れた核の巨大共鳴の研究が始まっている[6, 7]。特に、中性子過剰核における巨大単極子共鳴（GMR）は、中性子星のように極端な陽子-中性子バランスの核物質の“柔らかさ”（非圧縮率）を推定する上で重要である。

近年、巨大共鳴状態の典型的な励起エネルギーよりも低い領域に現れるピグミー（小人）共鳴状態に興味が持たれている。中性子過剰核において弱束縛中性子群である中性子スキンや中性子ハローが、強く束縛された芯に対して振動するものとして、存在可能性が議論されてきた。しかし、強度分布の精密測定が大阪大学核物理研究センターで行われ、 ^{208}Pb のような安定核にも存在することが確認された。核物質の情報と強く関連していることが議論されている[8]。中性子スキンの振動という描像の妥当性や、どの程度の集団性があるかといった検証が進行中である。

原子核中で、 π 中間子が“仮想的”ではなく、“リアル”な粒子として多数存在する「 π 中間子凝縮相」が 1970 年代に提唱された。これが通常の原子核や、中性子星のような高密度核物質で実現するかどうかは興味深い[9]。ジルコニウム 90 のガモフ・テラー巨大共鳴強度分布と、炭素 12 およびカルシウム 40 の準弾性散乱データが包括的に測定・解析され、短距離における核子間斥力やパウリ排除律の効果を表すランダウミグダル係数 g_{NN} 、 g_{Nd} が求められた。この値をもとに、中性子星において π 中間子凝縮相が現れうるかが議論され、太陽の 1.4 倍程度の質量を持つ中性

子星でも中間子凝縮相が出現し、中性子星の冷却機構に重大な影響を与えている可能性が指摘された[10]。

多彩な重イオンビームを用いることにより、パイ中間子モードである 0^- 状態の探索や、ガモフ・テラー励起の2フォノン版である二重ガモフ・テラー共鳴の探索が行われ、それらの状態の検出を示す実験結果が出はじめている。

非線型性あるいはゆらぎの効果が大きい低励起状態を微視的理論で記述するには、大きく二つのアプローチが取られる。一つは、時間依存密度汎関数法あるいは時間依存平均場近似の枠組みであり、もう一つは、複数の平均場を配位混合するものである。言わば、前者は時間をパラメータとして、後者は変形度などの生成座標をパラメータとして、多体ハミルトニアンの状態ベクトルを表現しようとするものである。変形共存／変形混合現象における、非軸対称変形自由度の役割が定量的に議論されるようになってきている[11, 12,13,14]。

■ 今後の計画

巨大共鳴状態は多重極度あるいは全角運動量によって分類できるが、どこまで高い多重極度が存在できるのかは分かっていない。また、共鳴幅すなわち減衰機構を微視的理論によって記述することができていない。これらは集団励起モードがどのように現れて、そして生き残るのかというメカニズムに直結する重要な課題である。集団振動状態はフォノンの励起と見なすことができるが、複数のフォノンが励起した状態は、励起エネルギーや遷移の仕方などどのようになっているのだろうか？原子核の形に応じて、その励起エネルギーが特徴的な振る舞いを示すことが知られているが、軸対称性を破った原子核や、八重極変形のような反転対称性を破った原子核において、どのような共鳴エネルギーになるかを調べることは面白い。また、回転運動と結合することで巨大共鳴状態の性質がどのように変容するのだろうか？究極的には、回転や変形・温度、超流動といった複数の変数の上での集団運動の多様性を追究し、核物質の物性の理解を深めたい。

配位混合の枠組みでは密度汎関数法に基づいた信頼性の高い計算が可能となったが、生成座標としてどのような自由度を選べば良いか、理論の中では教えてくれない。集団自由度を系自身が決めていく時間依存密度汎関数法の枠組みで自己無撞着に低励起状態を記述することは、この5-10年に達成すべき重要な理論的課題である。

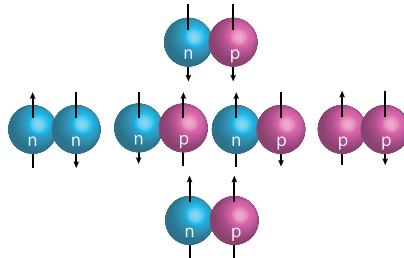
不安定核ビーム反応の逆運動学測定は多様な原子核の励起状態の性質や、その遷移強度の研究にとって強力な手段であるが、高分解能と言う点において、順運動学による質量欠損法は極めて強力な研究方法である。将来計画の1つである長寿命不安定核標的生成装置（BRILLIANT）により $N=Z$ 核はゲルマニウム 64 まで、鉛（錫）のアイソトープでは 190-214（106-130）の質量領域、アイソマーは 310 核種、奇奇核標的は 330 核種、標的的最大スピンは $37/2$ まで拡張される。これにより、励起状態の核構造のアイソスピン依存性や、特徴的な核を対象とした実験研究を大幅に拡張することができる。

スピン・アイソスピン励起に関して、 Δ 励起を含む原子核の広い励起エネルギー領域に対して、その応答を完全に理解することを目指す。これまで反応の断面積の運動量移行分布を用いて

移行角運動量を分離する多重極展開が開拓されてきた。特定のスピン・パリティに敏感なプローブや偏極観測量と組み合わせることにより、この手法をさらに発展させることは有意義であろう。

コラム: 中性子-陽子超流動相の発現可能性

偶々核（陽子数と中性子数がともに偶数の原子核）では、基底状態と第一励起状態との間のエネルギー差が大きい。金属の超伝導現象を説明する BCS 理論が発表された翌年（1958 年）には、原子核の基底状態において陽子対や中性子対がクーパー対として凝縮している可能性が提案された。基底回転バンドの慣性モーメントが剛体値に比べて小さいことは超流体のヘス・フェアバンク効果の類推から、原子核が超伝導/超流動状態にあることを示唆している。



さて、二核子からなる系で唯一束縛状態として存在するのは重陽子（陽子と中性子の束縛状態）である。陽子と陽子、中性子と中性子の系は束縛しない。したがって、 $N=Z$ 原子核では、中性子-陽子間の対相関が強いことが想像できる。しかし、実験データの存在する軽い原子核の結合エネルギーの系統性や回転バンドの性質は、中性子-陽子の対凝縮・超流動が起きていないことと矛盾しない。開殻に多数の粒子が存在する方が強い相関が期待できるため、これまで実験の難しかった重い $N=Z$ 核での研究が望まれる。

理論的には、スピン 3 成分とアイソスピン 3 成分を持ちうる真空を記述しなければならない。さらに、核変形が同時に起きる可能性もあるため、実空間・スピン空間・アイソスピン空間・ゲージ空間のすべてにおいて変形できる、最も一般的な平均場理論の構築が求められる。その多次元・多変数空間の中で、エネルギーが最小となる状態を探していくチャレンジングな課題である。また、超流動ヘリウム 3 などスピン 3 重項超伝導にはスピンと空間が結合した多様な相構造が現れるが、重い $N=Z$ 原子核ではアイソスピン自由度と結合してさらに多彩な相構造をもつ可能性がある。

もし対凝縮して多様な相が現れると、それらの相への「相転移」現象として様々なソフトモードが生じる。さらにそれぞれの真空の性質に応じた特徴的な集団励起モードが発現する。実際問題としては、それらの励起モードを観測・分析することで、原子核の相構造が分かってくる。

- [1] S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yoshida, Y. Hashimoto, and K. Yabana, Phys. Rev. C **82**, 034306 (2010).
- [2] G. Scamps and D. Lacroix, Phys. Rev. C **88**, 044310 (2013).
- [3] K. Yoshida, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013**, 113D02 (2013).
- [4] M. Martini, S. eru, and S.) Goriely, Phys. Rev. C **89**, 044306 (2014).
- [5] M. T. Mustonen, T. Shafer, Z. Zenginerler, and J. Engel, Phys. Rev. C **90**, 024308 (2014).
- [6] M. Sasano *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 202501 (2011).
- [7] C. Monrozeau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 042501 (2008).
- [8] A. Tamii *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 062502 (2011).
- [9] 土岐博, 二見靖彦, 物理学会誌 **34**, 847 (1979).
- [10] M. Ichimura, H. Sakai, and T. Wakasa, Prog. Part. Nucl. Phys. **56**, 446 (2006).
- [11] N. Hinohara, K. Sato, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and K. Matsuyanagi, Phys. Rev. C **82**, 064313 (2010).
- [12] M. Bender and P. -H. Heenen, Phys. Rev. C **78**, 024309 (2008).
- [13] J. M. Yao, J. Meng, P. Ring, and D. Vretenar, Phys. Rev. C **81**, 044311 (2010).
- [14] T. R. Rodriguez and J. L. Egido, Phys. Rev. C **81**, 064323 (2010).

2.2.3.3 テンソル相関と核内相関

■ 概要

原子核の構造の記述には、核子-核子散乱の実験データから求めた現実的核力 (2.2.1.1 節) に基づく方法が基本となるが、量子多体問題として厳密に解くことができない。そのため、原子核内の核子間に働く核力を中心力やスピン・軌道力に、あるいはそれらの核力の効果を密度依存性として繰り込んだ平均場近似が用いられてきた。ここで平均場とは原子核内の全ての核子が作り出す一体場である。原子核は核子間に強い核力が働くにもかかわらず、原子核内の核子が殆どの場合平均場中を運動する自由 (独立) 粒子として振舞う。それは現代社会に生きる人間が周りの人と相互作用しつつも、殆どの時間ある決められた規則の範囲内で、独りで行動するのと似ている。しかし現実には、核子間は短距離での斥力やテンソル力といった平均場に繰り込むことが難しい強い成分 (非平均場核力) を持つ。社会で言えば、独立な人間の間の平均的な関係で表せない特別な関係、親子や配偶者、師弟関係がこれにあたり、一人の人間の行動が関係者に大きな影響を与えることになる。これらの核力は平均場近似では記述できない二核子相関 (短距離相関や主に陽子 (p) と中性子 (n) の間に働くテンソル相関) を引き起こす (図 2.15)。核構造・核反応、そして中性子星の内部構造において無視できない効果をもた

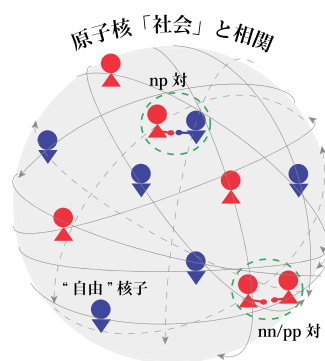


図 2.15 : 原子核内の “自由” 核子と核子対

らずと考えられている。実際、最近の研究から平均場の方法では説明できない事象が見つかってきている。

核子間にパイ中間子が交換されることによって強いテンソル力が生じる。2つの棒磁石の間に働く磁力が、棒磁石の位置関係とそれぞれの磁石の方向によって変わる様に、テンソル力の大きさは相互作用する2核子の位置とそれぞれの核子のスピン方向によって変わる(図2.16)。テンソル力は重陽子を束縛させる原動力であり、重陽子にわずかに楕円体型電荷分布をもたらすなど、原子核における重要性について原子核研究の初期から認識されてきた。一方、短距離相関は2核子間距離がおよそ 0.5 fm に近づいた

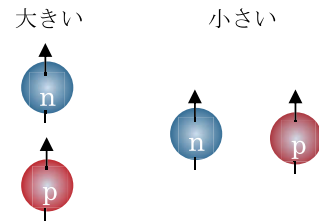


図 2.16 : 核子相対位置とテンソル力の大きさ

時に働く反発力によって生じ、その起源はクォーク間に働く力 [1] であると言われている。テンソル相関及び短距離相関は、平均場では想定されていない高い運動量を持った2核子が総運動量をゼロに組んだ対を原子核内にもたらす。この高運動量成分こそが、これらの力が原子核にもたらす最も特徴的な効果の一つである。

テンソル力のもう一つの特徴はスピン (S)、アイソスピン (I)、及び全角運動量とパリティ (J^π) の選択性があることである。殻模型を始めとする平均場模型では、原子核内の核子は平均場によって形成される単一粒子準位をエネルギーの低い準位から順に占めて行く。ところが、テンソル力は平均場模型では現れない“準重陽子”相関 (スピン 1、アイソスピン 0 の pn 対が異なる角運動量状態で混合する) を原子核内に誘起する。そのため、平均場の基底状態に高い単一粒子エネルギー配位が混合する。清水、市村及び有馬はテンソル力による配位混合を主張し、原子核の荷電変換反応 — (p, n) 反応 — で観測された Gamow-Teller 遷移確率の和が理論予測の 50% にしか満たしていない問題、いわゆる Gamow-Teller クエンチング問題に対する説明を提案した [2]。そして、清水らの予想は二十数年後に、若狭らが阪大 RCNP で行った実験によって大方証明された [3]。

原子核におけるテンソル相関及び短距離相関の実験的検証は容易ではないが、上述した特徴を生かした手法が進められている。また、テンソル力・短距離斥力をより明確に扱った理論模型の構築が進められている。今後、これらの理論模型によって核構造や反応を自然に記述し、それを実験で検証していくことが重要な課題となる。

■ 最近の進展

米国のトーマスジェファーソン国立研究所やブルックヘブン国立研究所において、($e, e'p$)、($e, e'pN$) [4] や (p, ppN) [5] 核子ノックアウト反応、また、阪大 RCNP 及びドイツ GSI では (p, d) [6]、(p, dN) [7] 核子移行反応を用いた実験が精力的に行われている。高運動量を持った核子の測定、あるいは陽子-中性子対、陽子-陽子対の測定から、原子核内の核子間テンソル相関及び短距離相関の原子核構造への寄与が少しずつ明らかになってきた。原子核から「準重陽子」相関する

核子対を「抜き去る」と、もとの原子核の基底状態と同じアイソスピンの状態が優位に作られる。このことに着目し、ヘリウム 4 [8]及び炭素 12、酸素 16 [7]への (p, dp) 及び (p, dn) 反応を用いた実験研究が阪大 RCNP を中心に行われ、テンソル相関によって核子の存在確率が增大すると予想される運動量領域において、テンソル相関に起因する陽子-中性子対が顕著に観測された。

核子相関を直接プローブする以上の手法の他に、スピン反転する励起状態の測定を利用した実験研究が行われている[9, 10]。これらの研究では、テンソル力を有効相互作用として取り入れた平均場計算との比較から、テンソル力の核構造への寄与についての議論を行った。

■ 今後の計画

阪大 RCNP で行なわれている (p, d) 、 (p, dN) 反応の測定からは、高運動量成分及び核子対の核構造依存性を示唆するデータが得られた。今後陽子ビームエネルギーを上げ、より大きく広い運動量移行の反応測定を行うことで、短距離・テンソル相関のより定量的な研究を目指す。また、放出粒子を高分解能で測定することにより、原子核構造における短距離・テンソル相関の役割について徹底的に議論する。

中性子あるいは陽子過剰核、特に弱く束縛されている原子核では、テンソル相関及び短距離相関は安定核と比べて異なる強さを示すと考えられる。理研 RIBF やドイツ GSI では、核子あたり 200～1000 MeV の不安定核ビームを用いた (p, d) 、 (p, pN) 、 (p, dN) 反応、及び SCRIT(3-5 節)を用いた $(e, e'pN)$ 反応等によって、テンソル相関・短距離相関の研究が展開されると期待できる。

現実的核力から出発する第一原理計算 [11]、短距離斥力・テンソル力をより正確に取り扱う TOAMD [12]などの理論の発展、及び上述した実験の展開により、短距離相関・テンソル相関の理解を促進し、核構造や中性子星の内部構造・ダイナミクス解明に新たな手掛かりを与えるであろう。

- [1] M. Oka and K. Yazaki, Phys. Lett. B 90 (1980) 41.
- [2] K. Shimizu *et al.*, Nucl. Phys. A 226 (1974) 282.
- [3] T. Wakasa *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) 2909.
- [4] R. Subedi *et al.*, Science 320 (2008) 1476.
- [5] E. Piasetzky *et al.*, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 162504.
- [6] H.J. Ong *et al.*, Phys. Lett. B 725 (2013) 277.
- [7] S. Terashima *et al.*, RCNP-E443 proposal.
- [8] K. Miki *et al.*, Few-Body Syst. 54 (2013) 1353.
- [9] T. Wakasa *et al.*, Phys. Rev. C 85 (2012) 064606.
- [10] H. Matsubara *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 102501.
- [11] J. Carlson *et al.*, Rev. Mod. Phys. 87 (2015) 1067.
- [12] T. Myo *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 073D02.

2.2.4 ハドロン相の状態方程式の理解

2.2.4.1 状態方程式

■ 概要

2.2.2 節で見たように原子核には中性子数・陽子数によって決まる殻構造があり、核の性質を決める重要な役割を果たしている。一方で、この殻構造をならした滑らかな物質としてその特徴を捉えることができる。物性学での状態方程式に対応する、核物質の状態方程式である。核物質

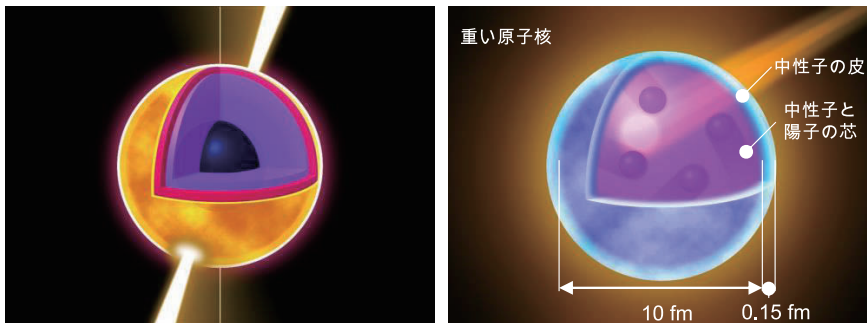


図 2.17：中性子星の構造(左)と原子核の構造(右)。

の状態方程式は、原子核の陽子・中性子密度分布などの静的な性質や、表面振動などの集団励起状態、原子核同士の衝突反応などの動的な過程に直結する他、大部分が中性子からなる星である中性子星の性質や中性子連星の合体過程、超新星爆発などの宇宙現象を決める上で欠かせない情報である。

物性学では物質の状態方程式を温度、体積、圧力、モル数などの状態量の関係式として表すことが多い。原子核物質の状態方程式では、1 核子あたりのエネルギー (E/A) を核子数密度 (ρ)、温度 (T)、非対称度 (δ) の状態量の間の関係式として表す。核物質は中性子と陽子という 2 種類の物質からなるため、中性子と陽子の密度のアンバランスを表すパラメータである非対称度 (δ) という状態量が式に入ってくる。非対称度は、全てが中性子から成る物質では 1、全てが陽子の物質では -1、中性子と陽子の数 (密度) が同じ物質では 0 と定義される (核物質の圧縮率については集団運動の節を参照のこと)。

原子核の状態方程式を表す性質の 1 つである対称エネルギーに近年注目が集まっている。対称エネルギーは陽子 1 つを中性子 1 つに (あるいは中性子 1 つを陽子 1 つに) 置き換えたときの系のエネルギーの変化を表す。通常の原子核では陽子数と中性数が近いので、原子核の性質を詳しく調べることで $\delta=0$ 付近の状態方程式の情報を得ることができる。一方で、中性子星のような中性子ばかりからなる物質 (中性子物質) を実験室で作り出すことは難しい。対称エネルギーの性質を調べることで、陽子 1 つを中性子 1 つに置き換えた時の変化が分かるため、これを繰り返した先に行き着く中性子物質の性質を調べるができるわけである。

核内の陽子と中性子の密度分布は、核全体のエネルギーが最小になる様に決まるので、温度ゼロでの状態方程式そのものによって決まると言える。特に中性子と陽子の密度分布の違いは対称エネルギーによって決まる。このことは次の様に理解できる。対称エネルギーは核子密度が大きいほど大きい。そのため、核子密度が高いほど陽子・中性子のアンバランスによって系のエネルギーが増えるので、アンバランスをより避けたがる傾向が強くなる。中性子数が陽子数よりも多い重い核では、核子密度が高い核内部の領域での中性子数と陽子数の差を減らし、核子密度が低い核表面へ余った中性子を押し出そうとする力が働く。これにより、陽子分布と中性子分布に差ができ、核表面に主に中性子からなる中性子層（中性子スキン）ができるというわけである。中性子層の厚さは対称エネルギーとその密度依存性によって決まる。逆にいえば、重い核の中性子層、さらには陽子・中性子密度分布を詳しく調べることで、原子核物質の対称エネルギーの情報を引き出すことができることになる。

■ 最近の進展

原子核物質の状態方程式を調べる方法として、次の様な4つの手法がある。

- 1) 核子の間に働く力の性質を詳細に調べ、それらの積み上げとしての多体系の性質を計算によって引き出す。
- 2) 原子核の質量、半径、核子密度などの静的な性質や、外部から力を与えたときの応答（静的変化や運動）を調べ、それを矛盾なく記述する多体理論を構築して状態方程式の情報を引き出す。
- 3) 原子核同士の衝突において放出される粒子の種類、エネルギー、方向などを検出することによって調べ、その動的過程を記述する反応理論を構築して状態方程式の情報を引き出す。
- 4) 中性子星の質量と半径、中性子星連星合体時に放出される重力波、超新星爆発などの天体現象を観測し、天体現象をシミュレーションによって矛盾なく再現する状態方程式のパラメータの範囲を決める。

1) の手法は歴史的には古く、中性子物質の性質を決める計算などが行われてきた。核子の間に働く力を積み上げて厳密に計算していく第一原理計算の手法には、核子数が多くなると計算が急激に難しくなるという困難があるが、計算手法や計算機の能力の発展にともなって徐々に進展している(2.2.1.1 節)。一方で、中性子のみからなる物質の場合は計算を大きく簡略化できる。鍵の1つとなるのは3核子間ではじめて働く3核子間力などの性質を実験によりどう捉え、またその結果をどう計算に組み込んでいくかである。カイラル展開による核力の記述方法や核子を構成要素とする格子計算などの発展の後押しがあり、近年大きく進展している。

2) の手法では、多体系を記述する平均場計算やエネルギー密度汎関数法などの計算手法の発展から、広い原子核の領域の性質を精度良く記述する理論が出てきており、状態方程式の性質を議論する基礎が作られてきている。鍵となるのは、安定核の質量、電荷半径などの基礎情報のみからでは引き出すことが難しいパラメータに敏感な実験データを、いかに精度良く決めて行くか

ということである。陽子弾性散乱による中性子密度分布の測定、原子核に電氣的力を与えた時の応答である誘電分極率、原子核が膨張収縮して密度分布が変換する巨大単極子振動の周波数、中性子層の振動であるピグミー双極子振動の強度の観測など、多くの実験がその特徴を活かして状態方程式のパラメータ決定を推し進めている。

原子核の核子密度である飽和密度付近の情報は2)の手法によって調べることができるが、それより高い密度での状態方程式を引き出すことは難しい。これまでのところ、実験室によって高密度を実現できる可能性があるのは原子核衝突による手法3)のみである。原子核衝突実験による状態方程式の研究について、詳しくは第3章で述べている。また、近年の観測技術の発展により、天体観測による状態方程式研究4)の手法の実現が現実のものとなってきた。2017年に初めて観測された中性子星連星合体の重力波観測から、状態方程式のパラメータ範囲を決める試みが進められている。天体観測は広い密度領域での状態方程式のみならず、ニュートリノなどの素粒子反応、動的過程のシミュレーション、恒星の進化などを含む総合的な体系であるため、最終的には原子核の研究によって引き出された状態方程式が天体現象を矛盾なく説明できることが、原子核・宇宙の両研究領域においての試金石となる。

■ 今後の計画

状態方程式の決定には精密な物理量の測定が必要である。特に対称エネルギーなど、陽子と中性子の差に依存する量は原子核の質量などの精密量から決定することは難しい。誘電分極率の様な電気応答は基本的な測定量であり、陽子と中性子が異なる役割を果たす(差に敏感である)ため、対称エネルギーの研究に適している。既に結果が出ている ^{208}Pb , ^{120}Sn , ^{48}Ca に加えて他の主要核において、3%以上の精度の系統的測定が必要である。陽子散乱の手法に加え、実光子散乱や電子散乱での測定など、いくつかの異なる手法を組みわせることでより高精度にかつ包括的に電気応答の理解を進める。

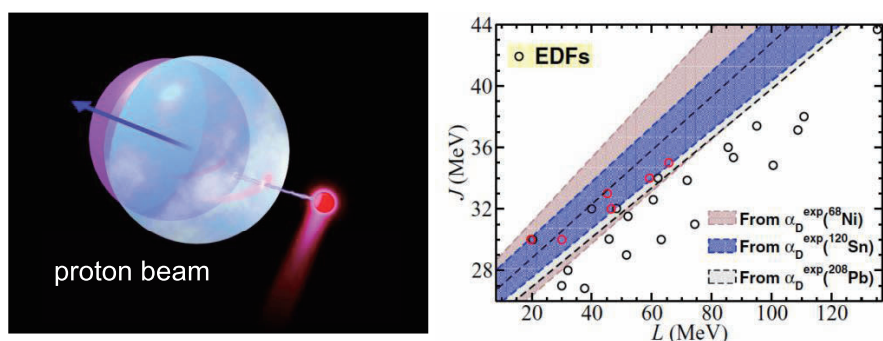
理論計算では、エネルギー密度汎関数法計算に加え、核子核子散乱から決められた相互作用や三体力を直接用いる第一原理的な計算が進展してきており、精密実験値との比較が進められている。原子核表面には、重い核においてもアルファクラスターが存在するという理論予測があり、状態方程式の決定に影響を与える可能性がある。この表面アルファクラスター探索の実験もRCNPにて進められている。

さらに次のステップとして、核物質の磁氣的性質に興味を持たれている。電気応答の場合と同様に核の磁気応答や磁化率を測定することで、状態方程式の磁氣的性質を調べることができる。謎の超高磁場天体マグネターの母星と考えられている中性子星の磁氣的性質や、中性子内部で強磁性体相転移が起きるかどうか、超新星爆発過程の中心部でのニュートリノ透過率とニュートリノ閉じ込め機構に直結する。近年の実験研究で変形核の低エネルギー磁気遷移(シサースモード)の強度がこれまで測定されてきたよりもずっと大きい可能性が示唆されており、核物質の磁化値に大きな影響を与える可能性がある。一方で、巨大双極子振動の減衰機構を調べる、研究が崩壊

ガンマ線の同時測定によって進められつつある。減衰機構は陽子と中性子の2流体間の摩擦（粘性）に直結する。

コラム: 原子核の電気応答と状態方程式

状態方程式を調べる方法の1つは、原子核に外部から小さな変化を与えた時に、原子核の状態がどう変わるかという「応答」を詳細に観測することである。布でこすった櫛を細かく切った紙に近づけると、櫛に紙が引っついてくる。これはよく知られた静電気現象で、中性の紙に電荷を持った櫛が近づくことにより、紙の中のプラス電荷とマイナス電荷の分布に偏りである誘電分極が生じ、櫛の電荷に引き寄せられることが原因である。磁石に鉄が引き寄せられる現象である磁化も同じ原理に基づく。



陽子ビームが生じるクーロン相互作用により原子核を励起する(左)。RCNPにて測定された ^{208}Pb , ^{120}Sn と GSI にて測定された ^{68}Ni の誘電分極率から決められた対称エネルギー J , L の許容範囲 (右)。

同様に原子核を電荷の近くや電場の中に置くことにより、原子核に電荷の偏りである誘電分極が生じる。陽子と中性子の電荷は異なるため、誘電分極の大きさは陽子と中性子の分布の違いを反映している。陽子と中性子のアンバランスを嫌う対称エネルギーが対抗するので、誘電分極の大きさは電気的力と対称エネルギーによる力のバランスで決まる。また、原子核には、陽子全体と中性子全体がお互いに単振動をする巨大双極子共鳴や、中性子スキンがそれ以外の中心部と相対振動するピグミー双極子共鳴などの振動状態があり、これらの振動の研究からも、単振動のバネに対応する復元力を生じる対称エネルギーの情報を引き出すことができると考えられている。核物理研究センターでは陽子ビーム散乱の手法を利用して、誘電分極率、巨大・ピグミー双極子共鳴などの原子核の電気的応答を精密に調べる研究を進めている。

折しも 2017 年 8 月に中性子星合体の重力波 (GW170817) が初めて観測された。得られた波形から合体時の中性子星の潮汐力変形を決め、対称エネルギーを引き出す議論が活発に進められている。まだ観測は 1 例ではあるが、得られた結果が原子核の実験による値とよく一致していることは特筆に値する。

2.2.4.2 準位密度と量子カオス—— 原子核に内在する本質的な無秩序性

■ 概要

原子の集団としての通常の物質は、低温では結晶構造を持つ一方、高温では液体やガスのような流体としてのふるまいを示す。同様に、核子の集団としての原子核も、極低温すなわちエントロピーが低い状況では殻模型で描写されるような秩序立った様相を示すが、エントロピーが高い状況では流体的な性質を示すことが知られており、液滴模型やフェルミガス模型などの統計力学的な模型によって取り扱われている。このような異なる 2 つの側面は、お互いにどのような関係にあるのだろうか？ またどういう場合にそれらの側面は顕在化するのだろうか？

量子系の状態の複雑さを評価する尺度のひとつは準位密度である。準位密度はエネルギー $E \sim E+dE$ の間でとり得る状態数によって定義され、原子核をフェルミ粒子である核子が集合した気体とみなすと、角運動量やパリティに対する依存性を考慮しないもっとも簡単なモデルでは、励起エネルギー E および質量数 A の関数として

$$\rho(A, E) \propto \frac{1}{E} \exp\left(2\sqrt{\frac{1}{15}AE}\right) \quad (\text{式2.1})$$

の様にあらわされる。したがって、密集したエネルギー準位の性質を調べるには、高い励起エネルギーまたは大きな質量数での原子核の励起状態を観察する必要がある。もっとも早期の実験研究は、中性子飛行時間法を用いた重い核の中性子共鳴反応の測定を通じて行われた。質量数 ~ 200 近辺の 27 核種から得られた準位間隔の分布を図 2.18 に示す。

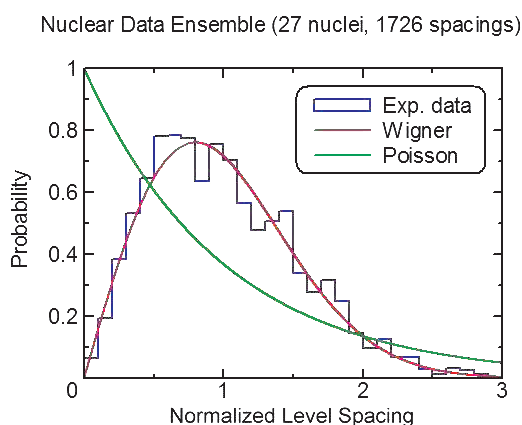


図 2.18 質量数～ 200 の 27 核種から得られた準位間隔分布。

青:実験データ、緑:ポアソン分布、赤;ウィグナー分布。

原子核の準位密度は 1 MeV あたり約 10^5 に達しており、平均的な準位間隔はわずか数 eV である。実験データが示すもっとも顕著な特徴は、準位間隔がゼロに近い領域の頻度が極めて小さい、という点である。この現象は「準位反発」と呼ばれている。これに対応する現象論的な分布として、

$$P(x) = C \cdot x \exp(-ax^2) \quad (\text{式 2.2})$$

の形の分布関数が 1956 年に E.ウィグナーによって提案された (C および a は定数)。この時点では、ウィグナーの提案は直感的な予想の域を出なかったが、1960 年代に入り、F.J.ダイソンらによって提唱されたガウス型アンサンブルに対するランダム行列の理論によって、その理論的背景が明らかになった。通常の量子統計力学が、定義されたハミルトニアン固有状態の占有率を統計的に扱うのに対して、ランダム行列理論ではハミルトニアン自体の行列要素が統計的に分布している点にその特徴がある。行列要素の分布関数としてガウス関数を仮定した上で、ハミルトニアン固有値の間隔を求めると、行列のタイプによって表 2.1 のような分布関数が得られる。

表 2.1 ガウス型アンサンブルに対するランダム行列とその固有値間隔が示す分布。

アンサンブル型	行列のタイプ	α	分布の名称
ガウス直交型 (GOE)	実対称行列	1	レイリー分布
ガウスユニタリー型 (GUE)	複素エルミート行列	2	マクスウェル分布
ガウス斜交型 (GSE)	四元数自己双対行列	4	---

なおこの表で、 α は (式 2) を一般化した α 次のウィグナー分布関数

$$P(x) = C \cdot x^\alpha \exp(-ax^2) \quad (\text{式 2.3})$$

に含まれるパラメータである（ただし現在までのところ、それぞれのランダム行列模型の固有値が示す分布とウィグナー分布は数値的には非常に良い一致を示すものの、厳密に等しいかどうかについては証明されていない）。このガウス型アンサンブルに対するランダム行列模型はその後さまざまな量子系にあてはめられ、強磁場下での水素原子など、非常に単純な系においてさえも準位反発が出現することなどが確認されている。また力学系にとどまらず、リーマンのゼータ関数の零点もウィグナー分布に従う間隔で現れることが知られている。

一方、準位反発を特徴として示すウィグナー分布と、それを示さない代表的な分布であるポアソン分布（または指数分布）との物理的な差異についても 1970 年代以降の研究によって重要な発見がなされた。1977 年には、自由度 2 以上の力学系が古典的に可積分である場合、それを量子化して得られるエネルギー準位はポアソン統計に従うことが ベリーとテイラーによって見出された。逆に、古典的に非可積分すなわちカオス的な力学系を量子化すると、ウィグナー分布に従うエネルギー準位が現れることが 1986 年、ボヒガス、ジャノニ、シュミットによって証明された。すなわち、重い核の中性子共鳴準位に見いだされた統計的な特徴は、その後大きな発展を見せた量子カオス研究の最初のきっかけとなったのである。

■ 最近の成果

前述の重い核の中性子共鳴では、質量数が多い場合の高準位密度状態が探索の対象となっていた。（式 2.1）によれば、質量数が小さくても励起エネルギーが高ければ、やはり準位密度の高い状態が現れるはずである。軽核の高励起状態を実験的に調べた例としては、原子核の E1 巨大共鳴における微細構造の探索が挙げられる。この実験は、産総研電子蓄積リング TERAS で供給される準単色のレーザー逆コンプトンガンマ線を入射ビームとして用い、 ^{13}C 、 ^{16}O 、 ^{28}Si などの標的に対する透過率を測定することにより、E1 巨大共鳴の励起関数を求めている。透過ガンマ線のエネルギーを高効率なコンプトン抑止型 Ge 検出器で測定することにより、励起エネルギー～15 MeV において半値幅 12 keV ($\Delta E/E = 0.08\%$) という超高分解能が達成されている。一方、大阪大学核物理研究センターや南アフリカ共和国・iThemba 研究所などでは、分散整合技術による高分解能ビームと大型の磁気スペクトロメータの組み合わせによって励起エネルギー数十 MeV の領域でエネルギー分解能 20～50 keV が得られており、広い質量数領域にわたってさまざまなモードの巨大共鳴に対する高分解能分光測定が進められている。さらに近年、励起スペクトルにウェーブレット解析等の新しい解析手法を適用することにより、準位相関に関する情報の抽出が実現しており（図 2.19 および図 2.20）、核子の秩序的な集団運動である巨大共鳴状態から、粒子放出を伴うカオス的な複合核状態へと遷移する際のダイナミクスが解明されつつある。

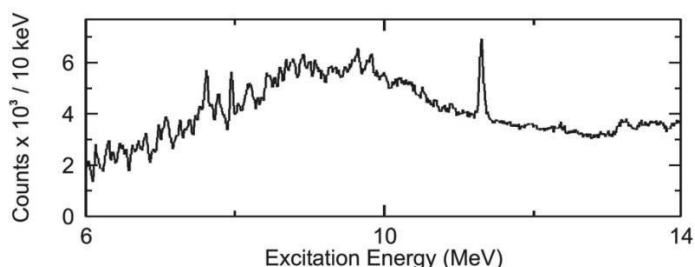


図 2.19：大阪大学核物理研究センター・GRAND-RAIDEN スペクトロメータを用いて測定された $^{90}\text{Zr}({}^3\text{He}, t){}^{90}\text{Nb}$ 反応における励起スペクトル。

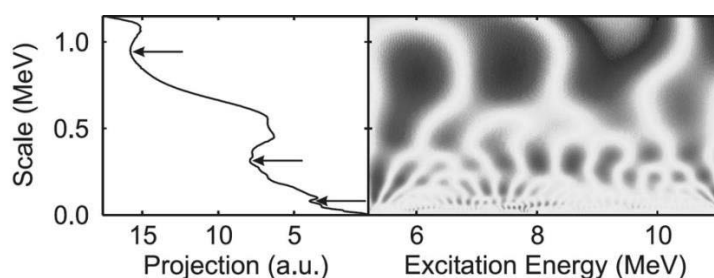


図 2.20：図 2.19 の励起スペクトルに対するウェーブレット解析で得られた準位相関スペクトル。縦軸は相関を示す特性エネルギースケールを表す。右図では、各励起エネルギーにおける各特性スケールの構造の強さを濃淡で示している。0.1 MeV、0.35 MeV、0.9 MeV 近傍に特徴的なエネルギースケールが現れており、ガモフ-テラー巨大共鳴状態の散逸過程において少なくとも 3 段階の強い特性スケールが存在することを示唆している。この特性スケールは核子間相関の時間スケールに対応する。

■ 今後の計画

前述の巨大共鳴の散逸過程においては、さらに多段階の時間スケールが存在するだろうか？ またそれは原子核の種類によってどのように変わるのだろうか？ 半古典的量子化法に基づく量子カオス研究では、自由度 2 の力学系においてもカオスが現れ得ることが確認されている。原子核においても、 ${}^3\text{H}$ や ${}^3\text{He}$ などの 3 核子系でも高励起状態では準位反発などのカオスの兆候が現れるだろうか？ これらを確かめるには、さらに高い分解能での測定が必要となる。また、準位密度の高い領域での中性子共鳴反応では、異なるパリティを持つ状態間の干渉によりパリティの破れに $10^5 \sim 10^6$ 倍の増幅が起きていることがわかっている。巨大共鳴領域でも同様にパリティの破れの増幅が起き得るのだろうか？ このような可能性を実験的に検証するには、高分解能かつ高偏極度を持つ良質なビームが有効と考えられる。

2.2.5 直接反応の真の理解

■ 概要

核反応とは、標的とする原子核に粒子を衝突させたときの応答である。入射粒子として核子、原子核、電子、光子などさまざまな粒子が考えられるが、電磁気力によって反応を起こす電子・光子の場合に比べて、強い相互作用である核力によって反応を起こす核子・原子核の場合には、標的核（と入射粒子）は容易に励起され、その反応機構は極めて複雑なものとなる。最も基本的な反応過程である弾性散乱（反応の前後で入射粒子・標的核は基底状態のまま変化せず、入射粒子は方向だけを変えて散乱される過程）においても、その中間の状態では、入射・標的核が励起する過程や粒子の種類を変える過程が関与し得る（図 2.21）。どのような反応が起こるかは反応

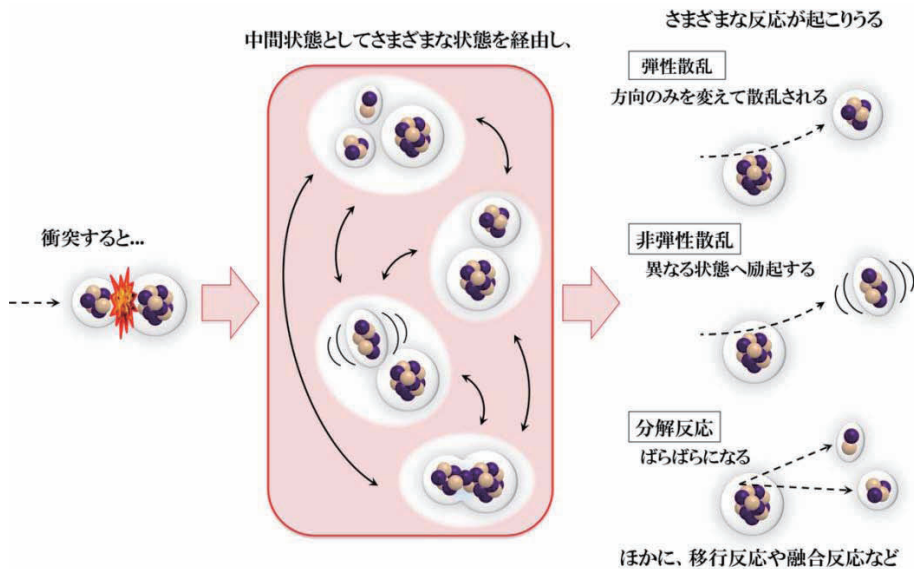


図 2.21：核反応のダイナミクスを端的に表したもの。

する核種や入射エネルギーに強く依存する。そのダイナミクスを記述する理論が核反応論である。入射エネルギーが低い場合（典型的に核子あたりの入射エネルギーが数 MeV 以下）には、入射粒子と標的核のすべての核子が渾然一体となった状態を経る複合核反応（複合核過程）が主に起こるが、入射エネルギーが高くなるにつれ、反応に関与する自由度が少数である直接反応（直接過程）が主要な寄与を果たす。反応研究の黎明期においては、加速器のビームエネルギーの制限から低エネルギー反応が精力的に研究され、複合核反応に対する統計模型が打ち立てられた。昨今ではビームエネルギーを自在に制御できる技術が進歩し、反応過程が比較的シンプルな直接反応の研究が盛んに行われている。直接反応は複合核反応に比べればシンプルとはいえ、関与する少数の自由度が摂動的に扱えるかどうかは全く自明ではなく、その記述は決して容易ではない。その複雑さを理解することが核反応研究の醍醐味のひとつである。

核力や核密度分布そのものは観測量ではなく、基本的に核物理の知見は反応観測量を解析することによって得られる。つまり、検出器で測定されたイベント数（断面積）とそれらをつなぐものの反応論であると言える。しかしながら核物理およそ 100 年の歴史を以てしても、あらゆる種類の反応を統一的に記述できる理論は未だ存在しない。反応に関与する膨大な数の自由度を正確に取り扱うことの難しさ、および強い斥力芯やテンソル力などを含む核力の複雑さが相まって、核子多体系の問題を厳密に解くことは困難である。そのため、記述したい反応の物理的特徴を捉え、その部分を特によく記述できる「模型」を構築する必要がある。現在までに、入射粒子と標的核間の相互作用を表す一体ポテンシャル（光学ポテンシャル）を基礎とする反応模型が多く提唱されてきた。光学ポテンシャルは弾性散乱角分布の実験データを再現するよう現象論的に決定されるが、不安定核に関与する反応では、弾性散乱の測定が困難なため光学ポテンシャルを精度よく決定することができないことも多く、その場合反応解析に大きな不定性を生じてしまう。しかし、近年光学ポテンシャルを含む反応過程の記述を核子間相互作用から微視的理論によって行う手法が発展したため、解析の不定性を小さく留めることが可能になってきた。その中には、光学ポテンシャルの微視的な導出も含まれる。核力に基づいて反応の非摂動的なダイナミクスを理解し、反応論を完成させたときこそ、我々は直接反応を真に理解したと言えるだろう。

微視的反応論は、反応観測量と核力・核構造の対応を明確に与えてくれる理論的枠組みであり、核力の性質（多体力、媒質効果など）や構造の静的・動的性質（基底状態の密度分布、状態遷移強度など）をより詳細に調べるために欠かすことのできない道具である。微視的反応論が完成すれば、実験データを我々が理解できる言葉に翻訳できると言っても過言ではない。反応論はそのような便利な道具である一方、測定できない物理量を予言できる強力な武器にもなり得る。定量性ある反応計算は、宇宙物理や原子力工学・医療物理など特定の核反応率が重要になる分野へも多大な貢献をもたらす。反応研究の展望は基礎物理の枠を超え、他分野にも跨り非常に大きく広がっている。

■ 最近の進展

1) 反応解析を通じた核力の性質の解明

核力を直接用いた第一原理的な反応計算（2.2.1 節を参照）は少数核子系に限られるため、核子多体系の反応では、核力そのものではなく媒質効果を含んだ有効核力によって反応を微視的に記述する。有効核力は核内で相互作用することに伴うパウリ原理や核内ポテンシャルの効果を取り込んだ密度依存型の核力である。近年ではさらに 3 核子力効果を含めた有効核力が構築されており、密度効果が強く影響する多体系の反応、例えば原子核-原子核の弾性散乱角分布などを活用して有効核力の研究が行われている[1]。有効核力の性質を理解することは原子核物質の状態方程式の微視的解釈に直結するため、このアプローチは 2.2.4 節の最近の進展で言及されている 1) の手法に対応し、ハドロン相の状態方程式の決定とも密接に関係している。

2) 反応機構の理解と核構造

微視的反応論が大きく進歩しており、弾性散乱や非弾性散乱など一部の反応に対しては調整パラメータなしに反応を記述できつつある。微視的解析を行うことで、不定性を最小にして核構造の情報を引き出すことが可能となる。

原子核の電磁遷移強度と非弾性散乱（反応によって入射粒子・標的核が励起され、入射粒子はその分のエネルギーを失って散乱される反応）の断面積には強い相関があるが、それがどのような関係で結ばれているかは自明ではない。このことに関して、炭素 12 の基底状態から O_2^+ 状態への単極遷移に関して、構造理論計算によって得られた遷移強度とアルファ粒子の非弾性散乱解析から引き出される遷移強度に矛盾があり、これは **missing monopole strength** 問題と呼ばれていた。従来の反応解析では、炭素 12 の基底状態と O_2^+ 状態の遷移のみしか扱われていなかったが、実際には O_2^+ 状態と 2_2^+ 状態の遷移も強く、 2_2^+ 状態を含めた非摂動計算によって構造計算と矛盾しない O_2^+ 状態への遷移強度が得られることが微視的反応論の枠組みによって示された[2]。

反応機構を直感的に理解する手段として、量子力学的系の視覚化は非常にわかりやすいアプローチである。低エネルギー重イオン反応における移行反応に対しては時間依存ハートリー・フォック計算を用いて、原子核同士の散乱をまさに見てきたように描くことができる[3]。また、反応が原子核のどの領域で強く起こっているかを可視化・分析することによって（図 2.22 参照）、ノックアウト反応などの原子核表面付近の情報を抽出する反応を利用した核内アルファクラスター構造の探索が行われている[4]。

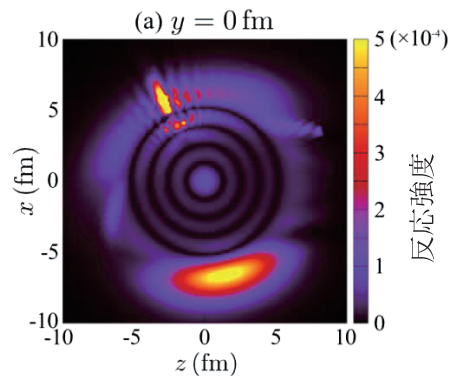


図 2.22：アルファ粒子ノックアウト反応における反応強度の空間分布。明るい色の領域で反応が高く、標的核であるスズ 120 の中心（図の中心）ではなく核表面で反応が起こっていることがわかる。

3) 予言力を持つ反応理論と他分野への応用

既に述べたように、反応研究の重要性は物理分野だけにとどまらず、その成果を宇宙物理・原子力工学・医療物理分野に応用できる。量子力学に基づく反応理論はバルクな系での反応に直接適用することはできないが、バルクな系に対するシミュレーションコードを改良することによって、間接的に貢献し得る。例えば、加速器や放射線医療の遮蔽計算に使われる粒子・重イオン輸送シミュレーションコード PHITS に組み込まれている重陽子入射反応の全反応断面積に対するモデルを改善した例がある[5]。これにより、重陽子が関与するあらゆるシミュレーションの精度が数 10% 向上した。

■ 今後の計画

ハドロンプローブとして代表的な核子-原子核の直接反応に関しては、弾性散乱の角分布を中心として多くの観測量が理論的に再現できつつある。核子-原子核反応に対する理解をより盤石なものとし、原子核-原子核反応まで微視的に理解することが現在の反応研究の目標のひとつである。核子多体問題の第一原理計算の進展は世界的に見て顕著であるものの、原子核-原子核の直接反応全般にそれを適用することは困難であり、有効核力を用いた模型計算が必須である。国内では主としてこのアプローチが推進されており、より多様な研究の展開が望まれる。

核力研究の観点では、カイラル有効場の理論に基づく核力構築研究の進展に伴い、それらの核力から出発して反応現象を記述することは核物理の主流のひとつになる。カイラル有効場理論は強い相互作用を支配する量子色力学に対する低エネルギー有効理論であり、量子色力学が持つ対称性を考慮しながらそのラグランジアンをパイ中間子の自由度で摂動展開することで、低エネルギーでは量子色力学と矛盾なく現象を記述できる理論である。これにより、2 核子力、3 核子力を系統的に扱うことが可能になった。カイラル有効場理論に基づく核力に立脚して微視的反応論を構築する枠組みが試みられている[6]。

コラム: 核反応と化学反応

自然界における代表的な反応現象として、より身近なのは化学反応であろう。巨視的に観測される化学反応は基本的に化学平衡である（中にはペロウソフ・ジャボチンスキー反応のような振動現象も存在する）が、核反応はそのようなエネルギー的に安定な平衡状態とは異なる動的現象と捉えられる。直接反応の時間スケールは 10^{-22} 秒程度であり、励起された原子核が崩壊するよりも短い。核反応では、反応を起こして放出される粒子を観測することによってどの反応が起こったかを特定するため、標的核の励起状態というエネルギー的に不安定な状態を直接観測できるのである。

核反応と化学反応で相互作用が異なることは言うまでもないが、反応に関与するエネルギースケールの違いも特筆すべきである。電磁気力を起源とする化学結合の典型的スケールが eV 単位（熱化学方程式でよく用いられる kJ/mol 単位に対応する）であるのに対し、核力による原子核束縛エネルギーの典型的スケールは MeV であり、 10^6 程度異なる。この違いは、1 mol の物質（原子核）が発熱反応を起こした場合に生じるエネルギーが 10^6 も異なることを意味する。核分裂および核融合反応が莫大なエネルギーを生み出す理由である。これは逆の見方をすると、1 g 分の原子核を別の種類の原子核に変換するには最低でもその程度のエネルギーが必要であることを意味する。そのような"錬金術"は、加速器なくしては決して成し得ない。実験室のフラスコの中で卑金属を金に変えるなど、夢のまた夢どころの話ですらなかったということである。

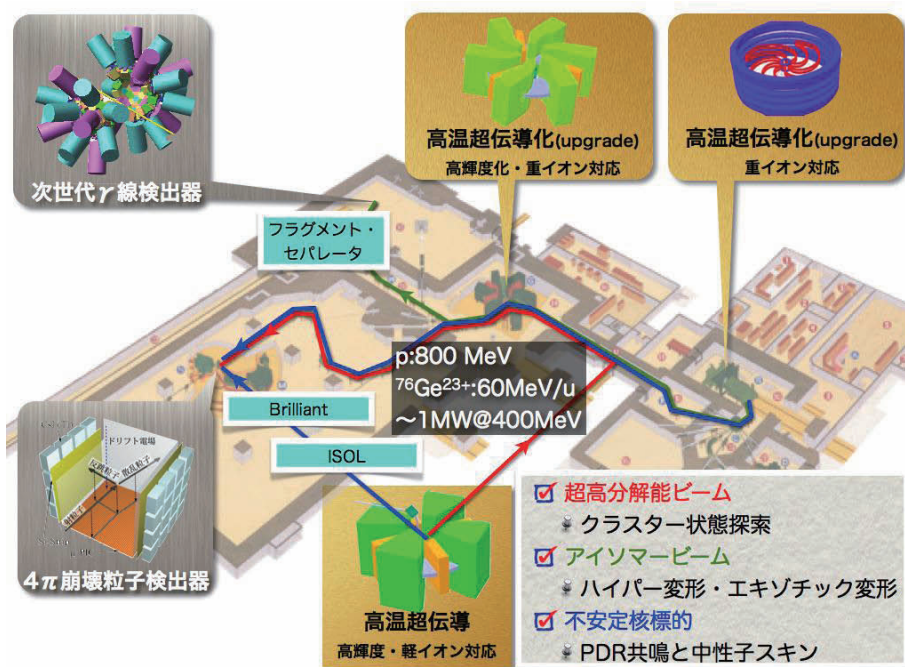
核構造の解明の点では、これまでの節で述べられている種々の現象を、反応解析を通じて実証することが課題である。中性子スキン厚を決定する手段が提案される[7]など、安定核はもちろんのこと、中性子過剰核が関与する反応に関しても解析が進んでいる。実験の精密測定に伴い、精

密核物理を実行するに堪える反応理論が強く望まれており、直接反応を真に理解することで、その要請に応えられるであろう。

- [1] T. Furumoto, Y. Sakuragi, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. C94, 044620 (2016).
- [2] K. Minomo and K. Ogata, Phys. Rev. C93, 051601 (2016).
- [3] K. Sekizawa and K. Yabana, Phys. Rev. C93, 054616 (2016).
- [4] K. Yoshida, K. Minomo, and K. Ogata, Phys. Rev. C94, 044604 (2016).
- [5] K. Minomo, K. Washiyama, and K. Ogata, Jour. Nucl. Sci. Technol. 54, 127 (2017).
- [6] M. Toyokawa, M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Kohno, Phys. Rev. C92, 024618 (2015).
- [7] W. Horiuchi, S. Hatakeyama, S. Ebata, and Y. Suzuki, Phys. Rev. C93, 044611 (2016).

2.3 将来計画

核物質物理の将来目標である「核物質の物性の理解」へ向けて前節までで説明した 5 つの柱を推進するために、全国共同利用拠点・共同利用センターである大阪大学核物理研究センターの将来計画として、「大強度・超高品質ビーム施設」の建設・整備を目指す。本計画は、下記で説明する三種の基幹装置からなる。これにより、励起エネルギー軸に沿った高品質測定の対象を安定核の領域外にも拡大し、「核物質の物性の理解」を目指す。



■ 新世代高温超伝導加速器

励起エネルギー-アイソスピン平面上の未開拓領域に対する精密核分光を可能とするために、今までの高品質ビーム生成技術を更に発展させ、下記の要求を満たすビームの供給を実現する。

超高品質軽イオンビーム

エミッタンス: $0.1 \pi \text{ mm mrad}$ 以下、かつビーム強度: $1 \mu\text{A}$ 以上。

ビームエネルギー: 精密核分光に最適な $K = 400 \text{ MeV}$ をカバー

可能なら $K = 800 \text{ MeV}$

大強度陽子ビーム

核破碎型 ISOL・中性子源などの駆動に適した、メガワット (MW) 級大強度・高エネルギー陽子ビーム

誘起核分裂型 ISOL の駆動に適した、大強度・低エネルギー陽子ビーム

大強度重イオンビーム

Xe 同位体までの、大強度・低エネルギー $\sim 10 \text{ MeV/u}$ 重イオンビーム

Ge 同位体までの、大強度・高エネルギー $\sim 60 \text{ MeV/u}$ 重イオンビーム

可能なら $\sim 140 \text{ MeV/u}$

超高品質軽イオンビームを得るために、軽イオン専用の $K=140 \text{ MeV}$ 超伝導リングサイクロトロン入射器を建設する。ハイパワー加速空洞と高調波加速空洞の導入により、ビームの大強度化と超高品質化を行う。また、本加速器は、後述の誘起核分裂型 ISOL の駆動にも利用する。

主加速器は、既存のリングサイクロトロンの主コイルを超伝導化し、高エネルギー重イオンにも対応した $K=800 \text{ MeV}$ 汎用主加速器としてアップグレードする。入射器と同様の加速空洞の導入により、ビームの大強度化と高品質化をはかるとともに、陽子ビームについて MW 級の出力を実現する。

重イオンの入射器は、既存の AVF サイクロトロンの主コイルを超伝導化し、 $K=200 \text{ MeV}$ 重イオン専用加速器としてアップグレードする。本加速器は、単独で大強度低エネルギー重イオンビームを供給するためにも用いる。

■ 革新的ビーム発生装置

オンライン不安定核生成・同位体分離・イオン化装置 (ISOL)

一般に不安定核ビームは二次ビームとして生成されるため、エミッタンスが大きく、このことが γ 線計測や散乱実験において大きな制約となっている。しかし、核破碎反応や誘起核分裂によ

り生じた不安定核を収集・同位体分離した上でイオン化し（このような装置を ISOL という）、加速すれば、一次ビームと同様の低エミッタンスの不安定核ビームが得られる。ISOL における不安定核イオンの収量は元素の種類に強く依存するが、すでに表面電離型イオン源を用いて毎秒 10^{11} 個が実現されている。そこで、ISOL の開発・整備により高品質の不安定核ビームを実現し、不安定核の γ 線分光や次項で述べる BRILLIANT に供する。

長寿命不安定核標的生成装置 BRILLIANT

原子核の励起状態の性質や、その遷移強度を高分解能で調べる上で、順反応条件下における質量欠損法は極めて強力な手法である。この測定方法を寿命 1 分以上の不安定核標的にまで拡張するのが、長寿命不安定核標的生成装置 BRILLIANT（Beam system for Reaction of Isotopes of Long-life with Light-Ions Applying Normal kinematics and implanted Target）である。BRILLIANT では、融合反応や ISOL 法を用いて生成した不安定核を効率よくオンライン収集し、直径 $10\mu\text{m}$ の大きさでホスト標的に打ち込んで (implant) 停止させる。この標的に、新加速器から供給される大強度・高品質軽イオンビームを照射すれば、質量欠損法に基づく高分解能測定が実現できる。

アイソマービーム生成装置

ビーム生成・輸送時間よりも長い (≥ 100 ns) 寿命を持つ高スピンアイソマーは、これをビームとして用いることができる。高スピンアイソマービームは、ビーム自身が大きな角運動量を持つため、ハイパー変形やエキゾチック変形状態など、従来のビームでは励起できない極限状態における原子核の物性研究を可能にする。そこで、高スピンアイソマービームを生成するために、目的のアイソマーを他の核反応生成物から分離するフラグメントセパレータを建設する。

超高分解能ビームライン

原子核のクラスター状態は、液相から気相への相転移の機構解明などにおいて重要であるが、一般に準位密度の高い励起エネルギー領域に存在する。したがって、状態を分離・同定するためには、数 keV というこれまでの高分解能 (20-40 keV) を更に超える超高分解能が必要とされる。そこで、新加速器によりビームエミッタンスを従来の $1/10$ に制限した上で分散整合技術を用いることにより、数 keV というガンマ線分光に匹敵する新次元の超高分解能測定を実現する。そのために、分散整合ビームラインを改良するとともに、 $\sim 100\mu\text{m}$ の収束を診断する検出器を開発する。

■ 先進的検出器

次世代ガンマ線検出器

ハイパー変形やエキゾチック変形原子核の励起状態から放出される微弱な多重ガンマ線を選別し、励起準位構造を解明するためには、高いエネルギー分解能を保持したまま従来の検出感度と信号雑音比を大幅に改善する必要がある。そのために、電極分割された Ge 検出器で構成されるトラッキング型の次世代ガンマ線検出器を開発する。標的を見込む立体角の増大により検出効率を 40%程度にまで増加させるとともに、ガンマ線のトラッキングにより信号雑音比を向上させ、1000 倍程度の感度の向上を目指す。それによりアイソマービーム等の強度の低い不安定核ビームを用いた実験を遂行可能とし、また、大強度ビームの利用のために、高レート耐性と高時間分解能も達成する。本検出器は、不安定核分野と共同で開発・整備・利用を推進する。

一方で励起状態の稀 γ 崩壊実験など、高分解能よりも検出効率を重視する研究を進めるため、シンチレーターによる大型ガンマ検出器アレイの開発を進める。想定されているのは、高速応答・高検出率をもちながら比較的分解能が高い LaBr₃ や GAGG 結晶を用いる方法である。グランドライデンと組み合わせた励起状態の研究の他、不安定核ビームや中性子、 μ 粒子など他ビームでの利用が想定される。

荷電粒子検出器

荷電粒子検出器は、励起状態からの崩壊粒子測定により、励起状態の微視的構造を解明するために必要である。例えば、より軽い娘核のアルファ凝縮状態への逐次 α 崩壊を測定することにより、親核のアルファクラスター凝縮状態を同定できる。また、不安定化核ビームを用いた逆運動学実験における反跳粒子検出器としても利用でき、質量欠損法により不安定核の励起スペクトルを崩壊の多重度の制限無く測定できる。必要な高エネルギー・角度分解能を実現するため、ストリップ幅 100 μm のシリコン検出器と CsI 検出器を組み合わせた大立体角検出器アレイを開発する。

■ レーザーコンプトン線施設の将来計画

産業総合研究所電子蓄積リング TERAS は日本の MeV 領域の γ 線発生施設の中心的な役割を担ってきたが 2011 年度をもってシャットダウンした。代って兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の新世代電子蓄積リング NewSUBARU がその役割を担うことが期待される。NewSUBARU は、top-up 入射により安定した強度、エネルギー、エミッタンス、高い偏光度の γ 線が生成でき、世界的にもユニークな実験施設である。更に高出力の連続波長可変レーザーを導入すれば、任意のエネルギーの γ 線が生成でき、

光核分解反応断面積の精密測定に大きく貢献すると期待できる。また、ルーマニアにおいて欧州共同の大強度レーザーコンプトン線施設 ELI-NP が建設中であり、近い将来に低エネルギー側ビームラインの γ 線ファーストビームを予定している。順次 20 MeV までの高エネルギー側ビーム

ラインを稼働する。今後のガンマ線ビームによる高分解能励起測定に威力を発揮することが期待される。

■ レーザー施設との共同による核物理

近年のレーザー技術の進歩により、時間空間の小さい局所領域において高温プラズマ領域を生成することがレーザー照射を行って可能になってきている。例えば関西光科学研究所（QST）の J-KAREN レーザーは 10^{22} W/秒を達成している。物質への照射により高温プラズマ領域を発生することができるほか、数から 10 MeV 領域の電子やイオンの加速を行えることが実証されている。こうした極端環境下での反応により、有限温度の原子核系や、高電磁場中での核反応といった、これまでアクセスすることができなかった新しい条件下での核物理を進展できる可能性があり、議論が進められている。極端環境下での核反応は、宇宙初期のビッグバン元素合成、中性子星上の核反応、超新星爆発、中性子星合体といった高温・高密度下の核反応を、実験室系で観測された素過程の核反応で記述できるかという根源的な問いを提出する。レーザー技術と従来の核物理の手法を融合した新たな展開が期待される。

2.4 他 WG、他分野との連携（他 WG 原稿をみつつ改訂）

不安定核分野及びハイパー核・ストレンジネス分野とは、研究の主軸が励起エネルギーであるかアイソスピン・ストレンジネスであるかという点が本質的違いであるが、研究目標である「核物質の物性の理解」のためには密接に連携し包括的に研究を推進する必要がある。また、原子核物質の状態方程式や核媒質効果については、高エネルギー重イオン分野（高温・高密度）、ハイパー核・ストレンジネス分野（高密度）、不安定核分野（高アイソスピン）と分野横断的な連携が必要である。

以下個別に、他分野との関連性や連携の重要性について述べる。

■ 不安定核分野

不安定核の基本問題と、核物質物理の将来の研究テーマは、核力・三核子間力、核子密度分布、状態方程式、中性子スキン・ハロー、核子間相関、ペアリング、アルファクラスター構造など多くのテーマで深く関連している。相互に連携しながら研究を推進する。

■ ハイパー核・ストレンジネス核物理分野

ストレンジネスを付与することにより、核力は、 $SU(2)$ 中性子-陽子系から $SU(3)$ へ拡張される。これにより、精密核物理分野が達成する $SU(2)$ における核力場による統一的理解が、ストレンジネスを含む $SU(3)$ の系の真の理解へと発展していくことが期待される。

ラムダ-シグマ間の質量差 (80MeV) が核子-デルタ間の質量差 (300MeV) よりも小さいため、ストレンジネスを含む系では三体力がより強いことが示唆される。両者を比較することにより、三体力の精密な記述とその起源の理解の深化が期待される。

中性子星などの核物質では π 中間子やストレンジネス凝縮が発現している可能性があり、高密度核物質の相転移の理解には横断的な連携が重要である。

ハイパー核プローブは原子核の深部の探索が可能な点で重要である。例えば、ストレンジネスの混入による核の変形度の変化は、変形メカニズム (自発的対称性の破れ) の理解に重要である。

■ 基礎物理分野

ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の寿命とマヨラナニュートリノ有効質量を結び付ける核行列要素は核構造計算から求めるが、理論に不定性がある。二重ベータ崩壊核に関する精密核のデータとの比較により核構造の記述精度を高め、実験の解釈をより高信頼度で行うことが可能となる。

